ભૌતિકવિજ્ઞાન

ભાગ II

ધોરણ XII

ગુજરાત રાજ્યના શિક્ષણવિભાગના પત્ર-ક્રમાંક
મશબ/1219/119-125/છ, તા. 16-02-2019 - થી મંજૂર

ભૌતિકવિજ્ઞાન

ભાગ II

ધોરણ XII

પ્રતિજ્ઞાપત્ર

ભારત મારો દેશ છે.
બધાં ભારતીયો મારાં ભાઈબહેન છે.
હું મારા દેશને ચાહું છું અને તેના સમૃદ્ધ અને
વૈવિધ્યપૂર્ણ વારસાનો મને ગર્વ છે.
હું સદાય તેને લાયક બનવા પ્રયત્ન કરીશ.
હું મારાં માતાપિતા, શિક્ષકો અને વડીલો પ્રત્યે આદર રાખીશ
અને દરેક જણ સાથે સભ્યતાથી વર્તીશ.
હું મારા દેશ અને દેશબાંધવોને મારી નિષ્ઠા અર્પું છું.
તેમનાં કલ્યાણ અને સમૃદ્ધિમાં જ મારું સુખ રહ્યું છે.

કિંમત : ₹ 153.00

राष्ट्रीय शैक्षिक अनुसंधान और प्रशिक्षण परिषद्
NATIONAL COUNCIL OF EDUCATIONAL RESEARCH AND TRAINING

ગુજરાત રાજ્ય શાળા પાઠ્યપુસ્તક મંડળ
'વિદ્યાયન', સેક્ટર 10-એ, ગાંધીનગર-382010

© NCERT, નવી દિલ્લી તથા ગુજરાત રાજ્ય શાળા પાઠ્યપુસ્તક મંડળ, ગાંધીનગર
આ પાઠ્યપુસ્તકના સર્વ હક NCERT, નવી દિલ્લી તથા ગુજરાત રાજ્ય શાળા પાઠ્યપુસ્તક મંડળને હસ્તક છે. આ પાઠ્યપુસ્તકનો કોઈ પણ ભાગ કોઈ પણ રૂપમાં NCERT, નવી દિલ્લી અને ગુજરાત રાજ્ય શાળા પાઠ્યપુસ્તક મંડળની લેખિત પરવાનગી વગર પ્રકાશિત કરી શકાશે નહિ.

અનુવાદ
પ્રો. ડૉ. પી. એન. ગજ્જર
પ્રો. એમ. એસ. રામી
પ્રો. ડૉ. એન. કે. ભટ્ટ
ડૉ. દીપક એચ. ગદાણી
શ્રી કે. ડી. પટેલ

સમીક્ષા
પ્રો. ડૉ. પી. બી. ઠાકોર
ડૉ. જી. એમ. સુતરિયા
ડૉ. તરુણ આર. ત્રિવેદી
શ્રી અશ્વિન એફ. ડોડિયા
શ્રી દિનેશ વી. સુથાર
ડૉ. મુકેશ એન. ગાંધી
શ્રી સી. ડી. પટેલ
શ્રી પી. એમ. પટેલ
શ્રી મયૂર એમ. રાવલ
શ્રી વાસુદેવ બી. રાવલ
શ્રી પરિતોષ એન. ભટ્ટ
શ્રી મહેશભાઈ ધાંધલા
શ્રી આનંદ એન. ઠક્કર
શ્રી નગીન એમ. પટેલ
શ્રી એ. જી. મોમીન

ભાષાશુદ્ધિ
પ્રો. ડૉ. દીપક બી. ભટ્ટ

સંયોજન
ડૉ. ચિરાગ એચ. પટેલ
(વિષય સંયોજક : ભૌતિકવિજ્ઞાન)

નિર્માણ-સંયોજન
શ્રી હરેન શાહ
(નાયબ નિયામક : શૈક્ષણિક)

મુદ્રણ-આયોજન
શ્રી હરેશ એસ. લીમ્બાચીયા
(નાયબ નિયામક : ઉત્પાદન)

પ્રસ્તાવના

રાષ્ટ્રીય સ્તરે સમાન અભ્યાસક્રમ રાખવાની સરકારશ્રીની નીતિના અનુસંધાને ગુજરાત સરકાર તથા ગુજરાત માધ્યમિક અને ઉચ્ચતર માધ્યમિક શિક્ષણ બોર્ડ દ્વારા તા. 25-10-2017ના ઠરાવ ક્રમાંક મશબ/1217/1036/છ - થી શાળા કક્ષાએ NCERTના પાઠ્યપુસ્તકોનો સીધો જ અમલ કરવાનો નિર્ણય કરવામાં આવ્યો તેને અનુલક્ષીને NCERT, નવી દિલ્લી દ્વારા પ્રકાશિત **ધોરણ XIIના ભૌતિકવિજ્ઞાન (ભાગ II)** વિષયના પાઠ્યપુસ્તકનો ગુજરાતીમાં અનુવાદ કરીને વિદ્યાર્થીઓ સમક્ષ મુકતા ગુજરાત રાજ્ય શાળા પાઠ્યપુસ્તક મંડળ આનંદ અનુભવે છે.

આ પાઠ્યપુસ્તકનો અનુવાદ તથા તેની સમીક્ષા નિષ્ણાત પ્રાધ્યાપકો અને શિક્ષકો પાસે કરાવવામાં આવ્યા છે અને સમીક્ષકોનાં સૂચનો અનુસાર હસ્તપ્રતમાં યોગ્ય સુધારા-વધારા કર્યા પછી આ પાઠ્યપુસ્તક પ્રસિદ્ધ કરતાં પહેલા આ પાઠ્યપુસ્તકની મંજૂરી માટે એક સ્ટેટ લેવલની કમિટીની રચના કરવામાં આવી. આ કમિટિની સાથે NCERTના પ્રતિનિધી તરીકે RIE, ભોપાલથી ઉપસ્થિત રહેલા નિષ્ણાતોની એક દ્વિદિવસીય કાર્ય શિબીરનું આયોજન કરવામાં આવ્યું અને પાઠ્યપુસ્તકને અંતિમ સ્વરૂપ આપવામાં આવ્યું છે. જેમાં ડૉ. એસ. કે. મકવાણા (RIE, ભોપાલ), ડૉ. કલ્પના મસ્કી (RIE, ભોપાલ), ડૉ. પી. એન. ગજ્જર, પ્રો. એમ. એસ. રામી, ડૉ. જી. એમ. સુતરિયા, શ્રી સી. ડી. પટેલ, ડૉ. એમ. એન. ગાંધી અને શ્રી મયૂર એમ. રાવલે ઉપસ્થિત રહી પોતાના કીમતી સૂચનો અને માર્ગદર્શન પૂરા પાડ્યા છે.

પ્રસ્તુત પાઠ્યપુસ્તકને રસપ્રદ, ઉપયોગી અને ક્ષતિરહિત બનાવવા માટે મંડળ દ્વારા પૂરતી કાળજી લેવામાં આવી છે, તેમ છતાં શિક્ષણમાં રસ ધરાવનાર વ્યક્તિઓ પાસેથી ગુણવત્તા વધારે તેવાં સૂચનો આવકાર્ય છે.

NCERT, નવી દિલ્લીના સહકાર બદલ તેમના આભારી છીએ.

અવંતિકા સિંઘ (IAS)
નિયામક
તા. 03-04-2019

કાર્યવાહક પ્રમુખ
ગાંધીનગર

પ્રથમ આવૃત્તિ : 2019

પ્રકાશક : ગુજરાત રાજ્ય શાળા પાઠ્યપુસ્તક મંડળ, ‘વિદ્યાયન’, સેક્ટર 10-એ, ગાંધીનગર વતી અવંતિકા સિંઘ, નિયામક

મુદ્રક :

FOREWORD

The National Curriculum Framework (NCF), 2005 recommends that children's life at school must be linked to their life outside the school. This principle marks a departure from the legacy of bookish learning which continues to shape our system and causes a gap between the school, home and community. The syllabi and textbooks developed on the basis of NCF signify an attempt to implement this basic idea. They also attempt to discourage rote learning and the maintenance of sharp boundaries between different subject areas. We hope these measures will take us significantly further in the direction of a child-centred system of education outlined in the National Policy on Education (NPE), 1986.

The success of this effort depends on the steps that school principals and teachers will take to encourage children to reflect on their own learning and to pursue imaginative activities and questions. We must recognise that, given space, time and freedom, children generate new knowledge by engaging with the information passed on to them by adults. Treating the prescribed textbook as the sole basis of examination is one of the key reasons why other resources and sites of learning are ignored. Inculcating creativity and initiative is possible if we perceive and treat children as participants in learning, not as receivers of a fixed body of knowledge.

These aims imply considerable change in school routines and mode of functioning. Flexibility in the daily time-table is as necessary as rigour in implementing the annual calendar so that the required number of teaching days are actually devoted to teaching. The methods used for teaching and evaluation will also determine how effective this textbook proves for making children's life at school a happy experience, rather than a source of stress or boredom. Syllabus designers have tried to address the problem of curricular burden by restructuring and reorienting knowledge at different stages with greater consideration for child psychology and the time available for teaching. The textbook attempts to enhance this endeavour by giving higher priority and space to opportunities for contemplation and wondering, discussion in small groups, and activities requiring hands-on experience.

The National Council of Educational Research and Training (NCERT) appreciates the hard work done by the textbook development committee responsible for this book. We wish to thank the Chairperson of the advisory group in science and mathematics, Professor J.V. Narlikar and the Chief Advisor for this book, Professor A.W. Joshi for guiding the work of this committee. Several teachers contributed to the development of this textbook; we are grateful to their principals for making this possible. We are indebted to the institutions and organisations which have generously permitted us to draw upon their resources, material and personnel. We are especially grateful to the members of the National Monitoring Committee, appointed by the Department of Secondary and Higher Education, Ministry of Human Resource Development under the Chairpersonship of Professor Mrinal Miri and Professor G.P. Deshpande, for their valuable time and contribution. As an organisation committed to systemic reform and continuous improvement in the quality of its products, NCERT welcomes comments and suggestions which will enable us to undertake further revision and refinement.

Director

National Council of Educational
Research and Training

New Delhi
20 December 2006

Preface

It gives me pleasure to place this book in the hands of the students, teachers and the public at large (whose role cannot be overlooked). It is a natural sequel to the Class XI textbook which was brought out in 2006. This book is also a trimmed version of the textbooks which existed so far. The chapter on thermal and chemical effects of current has been cut out. This topic has also been dropped from the CBSE syllabus. Similarly, the chapter on communications has been substantially curtailed. It has been rewritten in an easily comprehensible form.

Although most other chapters have been based on the earlier versions, several parts and sections in them have been rewritten. The Development Team has been guided by the feedback received from innumerable teachers across the country.

In producing these books, Class XI as well as Class XII, there has been a basic change of emphasis. Both the books present physics to students without assuming that they would pursue this subject beyond the higher secondary level. This new view has been prompted by the various observations and suggestions made in the National Curriculum Framework (NCF), 2005. Similarly, in today's educational scenario where students can opt for various combinations of subjects, we cannot assume that a physics student is also studying mathematics. Therefore, physics has to be presented, so to say, in a standalone form.

As in Class XI textbook, some interesting box items have been inserted in many chapters. They are not meant for teaching or examinations. Their purpose is to catch the attention of the reader, to show some applications in daily life or in other areas of science and technology, to suggest a simple experiment, to show connection of concepts in different areas of physics, and in general, to break the monotony and enliven the book.

Features like Summary, Points to Ponder, Exercises and Additional Exercises at the end of each chapter, and Examples have been retained. Several concept-based Exercises have been transferred from end-of-chapter Exercises to Examples with Solutions in the text. It is hoped that this will make the concepts discussed in the chapter more comprehensible. Several new examples and exercises have been added. Students wishing to pursue physics further would find Points to Ponder and Additional Exercises very useful and thoughtful. To provide *resources beyond the textbook* and to encourage *eLearning*, each chapter has been provided withsome relevant website addresses under the title *ePhysics*. These sites provide additional material on specific topics and also provide learners with opportunites for interactive demonstrations/experiments.

The intricate concepts of physics must be understood, comprehended and appreciated. Students must learn to ask questions like 'why', 'how', 'how do we know it'. They will find almost always that the question 'why' has no answer within the domain of physics and science in general. But that itself is a learning experience, is it not? On the other hand, the question 'how' has been reasonably well answered by physicists in the case of most natural phenomena. In fact, with the understanding of how things happen, it has been possible to make use of many phenomena to create technological applications for the use of humans.

For example, consider statements in a book, like 'A negatively charged electron is attracted by the positively charged plate', or 'In this experiment, light (or electron) behaves like a wave'. You will realise that it is not possible to answer 'why'. This question belongs to the domain of philosophy or metaphysics. But we can answer 'how', we can find the force acting,

we can find the wavelength of the photon (or electron), we can determine how things behave under different conditions, and we can develop instruments which will use these phenomena to our advantage.

It has been a pleasure to work for these books at the higher secondary level, along with a team of members. The Textbook Development Team, Review Team and Editing Teams involved college and university teachers, teachers from Indian Institutes of Technology, scientists from national institutes and laboratories, as well as, higher secondary teachers. The feedback and critical look provided by higher secondary teachers in the various teams are highly laudable. Most box items were generated by members of one or the other team, but three of them were generated by friends and well-wishers not part of any team. We are thankful to Dr P.N. Sen of Pune, Professor Roopmanjari Ghosh of Delhi and Dr Rajesh B Khaparde of Mumbai for allowing us to use their box items, respectively, in Chapters 3, 4 (Part I) and 9 (Part II). We are thankful to the members of the review and editing workshops to discuss and refine the first draft of the textbook. We also express our gratitude to Prof. Krishna Kumar, *Director*, NCERT, for entrusting us with the task of presenting this textbook as a part of the national effort for improving science education. I also thank Prof. G. Ravindra, *Joint Director*, NCERT, for his help from time-to-time. Prof. Hukum Singh, *Head*, Department of Education in Science and Mathematics, NCERT, was always willing to help us in our endeavour in every possible way.

We welcome suggestions and comments from our valued users, especially students and teachers. We wish our young readers a happy journey into the exciting realm of physics.

A. W. Joshi
Chief Advisor
Textbook Development Committee

TEXTBOOK DEVELOPMENT COMMITTEE

Chairperson, Advisory Group for Textbooks in Science and Mathematics

J.V. Narlikar, *Emeritus Professor,* Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics (IUCAA), Ganeshkhind, Pune University Campus, Pune

Chief Advisor

A.W. Joshi, Honorary Visiting Scientist, National Centre for Radio Astrophysics (NCRA), Pune University Campus, Pune (Formerly *Professor* at Department of Physics, University of Pune)

Members

A.K. Ghatak, *Emeritus Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, New Delhi

Alika Khare, *Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Guwahati

Anjali Kshirsagar, *Reader*, Department of Physics, University of Pune, Pune

Anuradha Mathur, *PGT* , Modern School, Vasant Vihar, New Delhi

Atul Mody, *Lecturer (S.G.),* VES College of Arts, Science and Commerce, Mumbai

B.K. Sharma, *Professor*, DESM, NCERT, New Delhi

Chitra Goel, *PGT,* Rajkiya Pratibha Vikas Vidyalaya, Tyagraj Nagar, New Delhi

Gagan Gupta, *Reader,* DESM, NCERT, New Delhi

H.C. Pradhan, *Professor,* Homi Bhabha Centre of Science Education (TIFR), Mumbai

N. Panchapakesan, *Professor* (*Retd.*), Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi

R. Joshi, *Lecturer* (S.G.), DESM, NCERT, New Delhi

S.K. Dash, *Reader,* DESM, NCERT, New Delhi

S. Rai Choudhary, *Professor,* Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi

S.K. Upadhyay, *PGT*, Jawahar Navodaya Vidyalaya, Muzaffar Nagar

S.N. Prabhakara, *PGT,* DM School, Regional Institute of Education (NCERT), Mysore

V.H. Raybagkar, *Reader*, Nowrosjee Wadia College, Pune

Vishwajeet Kulkarni, *Teacher* (*Grade I*), Higher Secondary Section, Smt. Parvatibai Chowgule College, Margao, Goa

Member-Coordinator

V.P. Srivastava, *Reader,* DESM, NCERT, New Delhi

THE CONSTITUTION OF INDIA

PREAMBLE

WE, THE PEOPLE OF INDIA, having solemnly resolved to constitute India into a [1]**[SOLVEREIGN SOCIALIST SECULAR DEMOCRATIC REPUBLIC]** and to secure to all its citizens :

JUTICE, social, economic and political;

LIBERTY of thought, expression, belief, faith and worship;

EQUALITY of status and of opportunity; and to promote among them all

FRATERNITY assuring the dignity of the individual and the [2][unity and integrity of the Nation];

IN OUR CONSTITUENT ASSEMBLY this twenty-sixth day of November, 1949 do **HEREBY ADOPT, ENACT AND GIVE TO OURSELVES THIS CONSTITUTION.**

---

1. Subs, by the Constitution (Forty-second Amendment) Act, 1976, Sec. 2, for "Sovereign Democratic Republic" (w.e.f. 3.1.1977)
2. Subs, by the Constitution (Forty-second Amendment) Act, 1976, Sec.2, for Unity of the Nation" (w.e.f. 3.1.1977)

Acknowledgements

The National Council of Educational Research and Training acknowledges the valuable contribution of the individuals and organisations involved in the development of Physics Textbook for Class XII. The Council also acknowledges the valuable contribution of the following academics for reviewing and refining the manuscripts of this book:

Anu Venugopalan, *Lecturer*, School of Basic and Applied Sciences, GGSIP University, Delhi; A.K. Das, *PGT*, St. Xavier's Senior Secondary School, Delhi; Bharati Kukkal, *PGT*, Kendriya Vidyalaya, Pushp Vihar, New Delhi; D.A. Desai, *Lecturer (Retd.)*, Ruparel College, Mumbai; Devendra Kumar, *PGT*, Rajkiya Pratibha Vikas Vidyalaya, Yamuna Vihar, Delhi; I.K. Gogia, *PGT*, Kendriya Vidyalaya, Gole Market, New Delhi; K.C. Sharma, *Reader*, Regional Institute of Education (NCERT), Ajmer; M.K. Nandy, *Associate Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Guwahati; M.N. Bapat, *Reader*, Regional Institute of Education (NCERT), Mysuru; R. Bhattacharjee, *Assistant Professor*, Department of Electronics and Communication Engineering, Indian Institute of Technology, Guwahati; R.S. Das, *Vice-Principal (Retd.)*, Balwant Ray Mehta Senior Secondary School, Lajpat Nagar, New Delhi; Sangeeta D. Gadre, *Reader*, Kirori Mal College, Delhi; Suresh Kumar, *PGT*, Delhi Public School, Dwarka, New Delhi; Sushma Jaireth, *Reader*, Department of Women's Studies, NCERT, New Delhi; Shyama Rath, *Reader*, Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi; Yashu Kumar, *PGT*, Kulachi Hans Raj Model School, Ashok Vihar, Delhi.

The Council also gratefully acknowledges the valuable contribution of the following academics for the editing and finalisation of this book: B.B. Tripathi, *Professor (Retd.)*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, New Delhi; Dipan K. Ghosh, *Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Mumbai; Dipanjan Mitra, *Scientist*, National Centre for Radio Astrophysics (TIFR), Pune; G.K. Mehta, *Raja Ramanna Fellow*, Inter-University Accelerator Centre, New Delhi; G.S. Visweswaran, *Professor*, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, New Delhi; H.C. Kandpal, *Head*, Optical Radiation Standards, National Physical Laboratory, New Delhi; H.S. Mani, *Raja Ramanna Fellow*, Institute of Mathematical Sciences, Chennai; K. Thyagarajan, *Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, New Delhi; P.C. Vinod Kumar, *Professor*, Department of Physics, Sardar Patel University, Vallabh Vidyanagar, Gujarat; S. Annapoorni, *Professor*, Department of Physics and Astrophysics, University of Delhi, Delhi; S.C. Dutta Roy, *Emeritus Professor*, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, New Delhi; S.D. Joglekar, *Professor*, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Kanpur; and V. Sundara Raja, *Professor*, Sri Venkateswara University, Tirupati.

The Council also acknowledges the valuable contributions of the following academics for refining the text in 2017: A.K. Srivastava, *Assistant Professor*, DESM, NCERT, New Delhi; Arnab Sen, *Assistant Professor*, NERIE, Shillong; L.S. Chauhan, *Assistant Professor*, RIE, Bhopal; O.N. Awasthi, *Professor* (*Retd.*), RIE, Bhopal; Rachna Garg, *Professor*, DESM, NCERT, New Delhi; Raman Namboodiri, *Assistant Professor*, RIE, Mysuru; R.R. Koireng, *Assistant Professor*, DCS, NCERT, New Delhi; Shashi Prabha, *Professor*, DESM, NCERT, New Delhi; and S.V. Sharma, *Professor*, RIE, Ajmer.

Special thanks are due to Hukum Singh, *Professor and Head,* DESM, NCERT for his support.

The Council also acknowledges the support provided by the APC office and the administrative staff of the DESM; Deepak Kapoor, *Incharge,* Computer Station; Inder Kumar, *DTP Operator*; Mohd. Qamar Tabrez, *Copy Editor;* Ashima Srivastava, *Proof Reader* in shaping this book.

The contributions of the Publication Department in bringing out this book are also duly acknowledged.

અનુક્રમણિકા ભૌતિકવિજ્ઞાન ભાગ I
ધોરણ XII

પ્રકરણ એક

વિદ્યુતભારો અને ક્ષેત્રો (ELECTRIC CHARGES AND FIELDS) 1

પ્રકરણ બે

સ્થિતવિદ્યુત સ્થિતિમાન અને કેપેસીટન્સ (ELECTROSTATIC POTENTIAL AND CAPACITANCE) 51

પ્રકરણ ત્રણ

પ્રવાહ વિદ્યુત (CURRENT ELECTRICITY) 93

પ્રકરણ ચાર

ગતિમાન વિદ્યુતભારો અને ચુંબકત્વ (MOVING CHARGES AND MAGNETISM) 132

પ્રકરણ પાંચ

ચુંબકત્વ અને દ્રવ્ય (MAGNESTISM AND MATTER) 173

પ્રકરણ છ

વિદ્યુતચુંબકીય પ્રેરણ (ELECTROMAGNETIC INDUCTION) 204

પ્રકરણ સાત

પ્રત્યાવર્તી પ્રવાહ (ALTERNATING CURRENT) 233

પ્રકરણ આઠ

વિદ્યુતચુંબકીય તરંગો (ELECTRO MAGNETIC WAVES) 269

જવાબો (ANSWERS) 288

અનુક્રમણિકા

FOREWORD v

PREFACE vii

પ્રકરણ 9

કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર અને પ્રકાશીય ઉપકરણો (RAY OPTICS AND OPTICAL INSTRUMENTS)

9.1 પ્રસ્તાવના 309

9.2 ગોળીય અરીસાઓ વડે થતું પ્રકાશનું પરાવર્તન 310

9.3 વક્રીભવન 316

9.4 પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન 319

9.5 ગોળીય સપાટીઓ આગળ અને લેન્સ વડે થતું વક્રીભવન 323

9.6 પ્રિઝમ દ્વારા વક્રીભવન 330

9.7 સૂર્યપ્રકાશને કારણે કેટલીક કુદરતી ઘટનાઓ 332

9.8 પ્રકાશીય ઉપકરણો 335

પ્રકરણ 10

તરંગ પ્રકાશશાસ્ત્ર (WAVE OPTICS)

10.1 પ્રસ્તાવના 351

10.2 હાઈગેન્સનો સિદ્ધાંત 353

10.3 હાઈગેન્સના સિદ્ધાંતની મદદથી સમતલ તરંગોનું વક્રીભવન અને પરાવર્તન 355

10.4 તરંગોનું સુસમ્બધ્ધ અને અસુસમ્બધ્ધ સરવાળો 360

10.5 પ્રકાશ તરંગોનું વ્યતિકરણ અને યંગનો પ્રયોગ 362

10.6 વિવર્તન 367

10.7 ધ્રુવીભવન 376

પ્રકરણ 11

વિકિરણ અને દ્રવ્યની દ્વૈત પ્રકૃતિ (DUAL NATURE OF RADIATION AND MATTER)

11.1 પ્રસ્તાવના 386

11.2 ઇલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન 387

11.3 ફોટો ઇલેક્ટ્રીક અસર 388

11.4 ફોટો ઇલેક્ટ્રીક અસરનો પ્રાયોગિક અભ્યાસ 389

11.5	ફોટો ઇલેક્ટ્રીક અસર અને પ્રકાશનો તરંગવાદ	393
11.6	આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઇલેક્ટ્રીક સમીકરણ : વિકિરણ ઊર્જાનો ક્વૉન્ટમ	393
11.7	પ્રકાશનું કણ સ્વરૂપ : ફોટોન	395
11.8	દ્રવ્યનું તરંગ સ્વરૂપ	398
11.9	ડેવિસન અને ગર્મરનો પ્રયોગ	403
-	પરિશિષ્ટ	412

પ્રકરણ 12

પરમાણુઓ (ATOMS)

12.1	પ્રસ્તાવના	414
12.2	આલ્ફા-કણ પ્રકીર્ણન અને પરમાણુ અંગેનું રધરફર્ડનું ન્યુક્લિયર મોડેલ	415
12.3	પરમાણુ વર્ણપટ	420
12.4	હાઈડ્રોજન પરમાણુનું બોહ્ર મૉડેલ	422
12.5	હાઈડ્રોજન પરમાણુના રેખીય વર્ણપટ	428
12.6	બોહ્રની ક્વૉન્ટમીકરણની બીજી સ્વીકૃતિની ડિ બ્રોગ્લીની સમજૂતી	430

પ્રકરણ 13

ન્યુક્લિયસ (NUCLEI)

13.1	પ્રસ્તાવના	438
13.2	પરમાણુ દળો અને ન્યુક્લિયસનું બંધારણ	438
13.3	ન્યુક્લિયસનું પરિમાણ	441
13.4	દળ-ઊર્જા અને ન્યુક્લિયર બંધન ઊર્જા	442
13.5	ન્યુક્લિયર બળ	445
13.6	રેડિયો એક્ટિવિટી	446
13.7	ન્યુક્લિયર ઊર્જા	451

પ્રકરણ 14

સેમિકન્ડક્ટર ઇલેક્ટ્રોનિક્સ : દ્રવ્યો, રચનાઓ અને સાદા પરિપથો

(SEMICONDUCTOR ELECTRONICS : MATERIALS, DEVICES AND SIMPLE CIRCUITS)

14.1	પ્રસ્તાવના	467
14.2	ધાતુઓ, સુવાહકો અને અર્ધવાહકોનું વર્ગીકરણ	468
14.3	શુદ્ધ (આંતરિક) અર્ધવાહક	472
14.4	અશુદ્ધ (બાહ્ય) અર્ધવાહક	474
14.5	*p-n* જંકશન	478
14.6	અર્ધવાહક ડાયોડ	479
14.7	જંકશન ડાયોડનો રેક્ટિફાયર તરીકે ઉપયોગ	483

14.8	કેટલાક વિશિષ્ટ હેતુ માટેના *p-n* જંકશન ડાયોડ	485
14.9	ડિજિટલ ઇલેક્ટ્રૉનિક્સ અને લોજિક ગેટ	490
પરિશિષ્ટ (APPENDICES)		500
જવાબો (ANSWERS)		502
BIBLIOGRAPHY		518
પારિભાષિક શબ્દો		520

Cover Design

(Adapted from http://nobelprize.org and the Nobel Prize in Physics 2006)

Different stages in the evolution of the universe.

Back Cover

(Adapted from http://www.iter.org and http://www.dae.gov.in)

Cut away view of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) device. The man in the bottom shows the scale.

ITER is a joint international research and development project that aims to demonstrate the scientific and technical feasibility of fusion power.

India is one of the seven full partners in the project, the others being the European Union (represented by EURATOM), Japan, the People's Republic of China, the Republic of Korea, the Russian Federation and the USA. ITER will be constructed in Europe, at Cadarache in the South of France and will provide 500 MW of fusion power.

Fusion is the energy source of the sun and the stars. On earth, fusion research is aimed at demonstrating that this energy source can be used to produce electricity in a safe and environmentally benign way, with abundant fuel resources, to meet the needs of a growing world population.

For details of India's role, see Nuclear India, Vol. 39, No. 11-12/ May-June 2006, issue available at Department of Atomic Energy (DAE) website mentioned above.

પ્રકરણ નવ

કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર અને પ્રકાશીય ઉપકરણો

RAY OPTICS AND OPTICAL INSTRUMENTS

9.1 પ્રસ્તાવના (INTRODUCTION)

કુદરતે મનુષ્યની આંખ (ખરેખર Retina)ને વિદ્યુતચુંબકીય વર્ણપટ પૈકીના નાના વિસ્તારના તરંગોની પરખ માટે જ સંવેદનશીલ બનાવી છે. વર્ણપટના આ વિસ્તારના વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણ (તરંગલંબાઈ લગભગ 400 nm થી 750 nm) પ્રકાશ (Light) તરીકે ઓળખાય છે. મુખ્યત્વે આ પ્રકાશ અને દૃશ્ય ઈન્દ્રિય મારફતે જ આપણે આસપાસના વિશ્વને જોઈ અને સમજી શકીએ છીએ.

આપણા સામાન્ય અનુભવ પરથી પ્રકાશ વિશે બે મહત્ત્વના મુદ્દાઓનો ઉલ્લેખ કરી શકીએ છીએ. એક એ છે કે પ્રકાશ અતિ તીવ્ર ઝડપથી ગતિ કરે છે અને બીજો એ છે કે તે એક સીધી રેખામાં ગતિ કરે છે. લોકોને એ સમજતાં થોડો સમય લાગ્યો કે પ્રકાશની ઝડપ સિમીત અને માપી શકાય તેવી છે. શૂન્યાવકાશમાં તેનું અત્યારે સ્વીકારાયેલ મૂલ્ય $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ છે. ઘણા હેતુઓ માટે $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ લેવાનું પુરતું છે. શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ એ કુદરતમાં મેળવી શકાય તેવી મહત્તમ ઝડપ છે.

પ્રકાશ એક સીધી રેખામાં ગતિ કરે છે એ ખ્યાલ અને આપણે પ્રકરણ-8માં જે શીખ્યા હતા કે પ્રકાશ વર્ણપટના દૃશ્ય વિભાગના તરંગલંબાઈના વિદ્યુતચુંબકીય તરંગ છે, તે ખ્યાલ એકબીજાથી વિરુદ્ધ લાગે છે. આ બંને હકીકતોને કેવી રીતે એક કરી શકાય ?

આ પ્રશ્નનો જવાબ એ છે કે આપણે રોજીંદા વ્યવહારમાં ઉપયોગમાં લઈએ છે તેવી વસ્તુઓની સરખામણીમાં પ્રકાશની તરંગલંબાઈ ઘણી જ નાની છે. (વ્યવહારમાં આપણે થોડા cm કે તેનાથી વધુ લંબાઈની વસ્તુઓ ધ્યાનમાં લઈએ છીએ) આ પરિસ્થિતિમાં તમે પ્રકરણ-10માં અભ્યાસ કરશો તે મુજબ

પ્રકાશના તરંગને એક બિંદુથી બીજા બિંદુ સુધી તેમને જોડતા સુરેખ માર્ગે ગતિ કરતું લઈ શકાય છે. પ્રકાશના ગતિમાર્ગને *કિરણ* કહે છે. આવા કિરણોના સમુહને કિરણજૂથ (Beam) કહે છે.

પ્રસ્તુત પ્રકરણમાં આપણે પ્રકાશના કિરણ સ્વરૂપની મદદથી પરાવર્તન, વક્રીભવન અને વિભાજન જેવી ઘટનાઓનો અભ્યાસ કરીશું. પરાવર્તન અને વક્રીભવનના મૂળભૂત નિયમોનો ઉપયોગ કરી, આપણે સમતલ અને ગોળીય પરાવર્તક અને વક્રાકાર સપાટીઓ વડે રચાતા પ્રતિબિંબોનો અભ્યાસ કરીશું. પછી આપણે માનવ આંખ સહિત કેટલાંક મહત્વનાં પ્રકાશીય ઉપકરણોની રચના અને કાર્યનું વર્ણન કરીશું.

પ્રકાશનું કણ (PARTICLE) મૉડેલ

ન્યૂટનની ગણિતશાસ્ત્ર, યંત્રશાસ્ત્ર અને ગુરુત્વાકર્ષણમાં પાયારૂપ ભૂમિકાને કારણે તેણે કરેલા પ્રકાશના ખૂબ જ ઊંડાણપૂર્વકના સૈદ્ધાંતિક અને પ્રાયોગિક કાર્ય બાબતે આપણે ઘણીવાર અજાણ રહીએ છીએ. ન્યૂટનની પ્રકાશ-શાસ્ત્રમાં પણ એક પ્રણેતા (Pioneer) તરીકેની મહત્ત્વની ભૂમિકા રહી છે.

ડેસ્કાર્ટેસ નામના વિજ્ઞાનીએ રજૂ કરેલા પ્રકાશના કણ-મૉડેલને તેણે આગળ વિકસાવ્યો, તેણે ધાર્યું કે પ્રકાશઊર્જા અત્યંત નાના-નાના સૂક્ષ્મ કણોમાં કેન્દ્રિત થયેલી હોય છે. આ સૂક્ષ્મ કણોને તેણે *કૉર્પસ્ક્યુલ્સ* કહ્યા. તેણે વધુમાં એવી પણ ધારણા કરી કે આ પ્રકાશના સૂક્ષ્મકણો દળ રહિત અને સ્થિતિસ્થાપક કણો છે. ન્યૂટને તેની યંત્રશાસ્ત્રની સમજને આધારે આ સૂક્ષ્મકણોનાં પરાવર્તન અને વક્રીભવનનું સરળ મૉડેલ આપ્યું. એક સામાન્ય અવલોકન મુજબ જ્યારે સમતલ સપાટી પરથી બૉલનું પરાવર્તન થાય છે ત્યારે પરાવર્તનના નિયમોનું પાલન થાય છે. જ્યારે આ અથડામણ સ્થિતિસ્થાપક હોય છે ત્યારે વેગમાન તેનું તે જ રહે છે. સપાટી લીસી હોવાથી, સપાટીને સમાંતર કોઈ બળ લાગતું નથી, આથી વેગમાનનો આ દિશામાંનો ઘટક તેનો તે જ રહે છે. ફક્ત સપાટીને લંબદિશાનો વેગમાનનો ઘટક પરાવર્તનમાં ઊલટાય છે. ન્યૂટને એવી દલીલ કરી કે અરીસા જેવી લીસી સપાટીઓ પ્રકાશના સૂક્ષ્મકણોનું પરાવર્તન પણ બરોબર આ જ પ્રમાણે કરે છે.

વક્રીભવનની ઘટના સમજાવવા ન્યૂટને ધારણા કરી હતી કે આ સૂક્ષ્મ કણોની ઝડપ પાણી અને કાચ જેવા ઘટ્ટ માધ્યમમાં હવામાં વેગ કરતાં વધારે હોય છે. જો કે, પાછળથી એવું શોધાયું કે પ્રકાશનો વેગ પાણી અને કાચ જેવા માધ્યમમાં હવામાંના વેગ કરતાં ઓછો હોય છે.

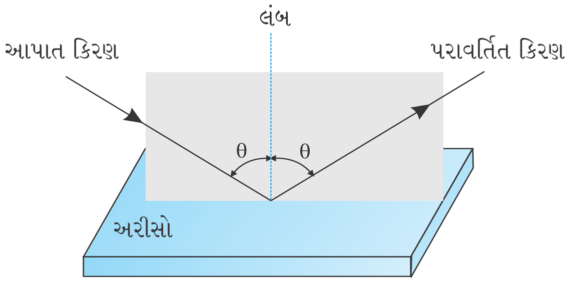
પ્રકાશશાસ્ત્રમાં ન્યૂટન-એક સિદ્ધાંતવાદી કરતાં ન્યૂટન-એક પ્રયોગકર્તા તરીકે વધુ મહાન રહ્યા છે. પ્રકાશના કણસ્વરૂપ વડે સમજવી ખૂબ જ કઠીન એવી ઘણી ઘટનાઓ ન્યૂટને સ્વયં જોઈ હતી. ઉદાહરણ તરીકે પાણી પર તેલનાં પાતળા સ્તરો વડે દેખાતા રંગોની ઘટના. પ્રકાશનાં અંશતઃ પરાવર્તનની ઘટનાનું બીજું ઉદાહરણ, તળાવમાં નજર કરતાં વ્યક્તિને તેનો પોતાનો ચહેરો પણ દેખાય છે અને તળાવનું તળિયું પણ દેખાય છે. ન્યૂટને એવી દલીલ કરી કે પાણી પર આપાત થતાં સૂક્ષ્મકણો (Corpuscles) પૈકી કેટલાક કણોનું પરાવર્તન થાય છે, જ્યારે કેટલાક કણો પારગમન પામે છે. પરંતુ આ બંને પ્રકારનાં સૂક્ષ્મકણોને અલગ પાડતો ગુણધર્મ કયો ? ન્યૂટને એવો અધિતર્ક કરવો પડ્યો કે કેટલીક શક્ય ઘટનાઓ છે, કે જે અગાઉથી જાણી શકાતી નથી કે કોઈ એક વ્યક્તિગત સૂક્ષ્મકણ પરાવર્તન પામશે કે નહીં. અન્ય કેટલીક ઘટનાઓ સમજાવવા એવું ધારી લેવામાં આવ્યું છે કે બધા જ સૂક્ષ્મકણો સમાન હોય તે રીતે વર્તે છે. પ્રકાશનાં તરંગ સ્વરૂપમાં આવી મુશ્કેલી ઉદ્‌ભવતી નથી, અને આપાત તરંગ હવા અને પાણીને છૂટા પાડતી સપાટી પાસે બે નબળા તરંગોમાં વિભાજીત થાય છે.

9.2 ગોળીય અરીસાઓ વડે થતું પ્રકાશનું પરાવર્તન (REFLECTION OF LIGHT BY SPHERICAL MIRRORS)

આપણે પરાવર્તનના નિયમોથી સુપરિચિત છીએ. આપાતકોણ (આપાત કિરણે પરાવર્તનકારક સપાટીને અથવા અરીસાને રચેલ લંબ સાથે બનાવેલો ખૂણો) અને પરાવર્તનકોણ (પરાવર્તિત કિરણે લંબ સાથે બનાવેલો ખૂણો) સમાન હોય છે. આપાત કિરણ, પરાવર્તિત કિરણ અને પરાવર્તનકારક સપાટીને લંબ એક જ સમતલમાં હોય છે (જેને આપાત સમતલ કહે છે). આપાત કિરણ અને પરાવર્તિત કિરણ લંબની સામસામેની બાજુ હોય છે (આકૃતિ 9.1). આ નિયમો સમતલ કે વક્ર દરેક પરાવર્તક સપાટીના કોઈ પણ બિંદુ પાસે સત્ય છે. છતાં, આપણો અભ્યાસ ગોળીય સપાટી પૂરતો મર્યાદિત રાખીશું. ગોળીય

સપાટી આપાત બિંદુ પાસે દોરેલા સ્પર્શકને લંબ, એ સપાટીને લંબ થશે. આ અર્થમાં અરીસાનાં વક્રતાકેન્દ્રમાંથી અરીસાની સપાટી પર કોઈ પણ બિંદુને જોડતો રેખાખંડ આ બિંદુ પાસે અરીસાને દોરેલ લંબ થશે.

આપણે અગાઉ અભ્યાસ કરી ચૂક્યા છીએ કે, ગોળીય અરીસાનાં ભૌમિતિક કેન્દ્રને અરીસાનો ધ્રુવ (Pole) P કહે છે, જ્યારે ગોળીય લેન્સ માટે તેને પ્રકાશીય કેન્દ્ર (Optical Centre) કહે છે. અરીસા માટે ધ્રુવીયબિંદુ P અને વક્રતાકેન્દ્ર Cને જોડતી રેખાને અરીસાની *મુખ્ય અક્ષ* કહે છે. ગોળીય લેન્સ માટે પ્રકાશીય કેન્દ્ર અને મુખ્ય કેન્દ્રને જોડતી રેખાને લેન્સની મુખ્ય અક્ષ કહે છે, તે તમે હવે પછી જોશો.

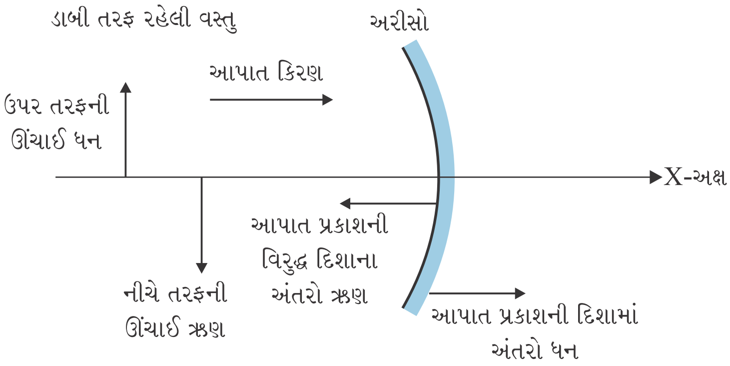


આકૃતિ 9.1 આપાત કિરણ, પરાવર્તિત કિરણ અને પરાવર્તક સપાટીને રચેલો લંબ એક જ સમતલમાં હોય છે.

9.2.1 સંજ્ઞા પદ્ધતિ (Sign Convention)

ગોળીય અરીસા દ્વારા થતા પરાવર્તન અને ગોળીય લેન્સ દ્વારા થતા વક્રીભવન માટે વિવિધ સૂત્રોની તારવણી માટે સૌ પ્રથમ, આપણે અંતરો માપવા માટે સંજ્ઞા પદ્ધતિ સ્વીકારીશું. આ પાઠ્યપુસ્તકમાં આપણે *કાર્તેઝિય સંજ્ઞા પદ્ધતિ*ને અનુસરીશું. આ સંજ્ઞા પદ્ધતિ મુજબ અરીસા માટે તમામ અંતરો ધ્રુવ (Pole) Pથી માપવામાં આવે છે અને લેન્સ માટે તમામ અંતરો તેના પ્રકાશીય કેન્દ્રથી માપવામાં આવે છે. આપાત કિરણની દિશામાં મપાયેલા અંતરો ધન ગણાય છે. જ્યારે આપાત કિરણની વિરુદ્ધ દિશામાં મપાયેલા અંતરો ઋણ ગણાય છે (આકૃતિ 9.2). X-અક્ષની ઉપર તરફની અને અરીસા/લેન્સની મુખ્ય અક્ષને લંબ ઊંચાઈઓ ધન અને નીચે તરફની ઊંચાઈઓ ઋણ લેવામાં આવે છે.

આ સ્વીકૃત સંજ્ઞા પદ્ધતિ વડે અરીસા માટે એક સૂત્ર તેમજ લેન્સ માટે એક સૂત્રની મદદથી જુદા જુદા બધા કિસ્સાઓ સમજાવી શકાય છે.

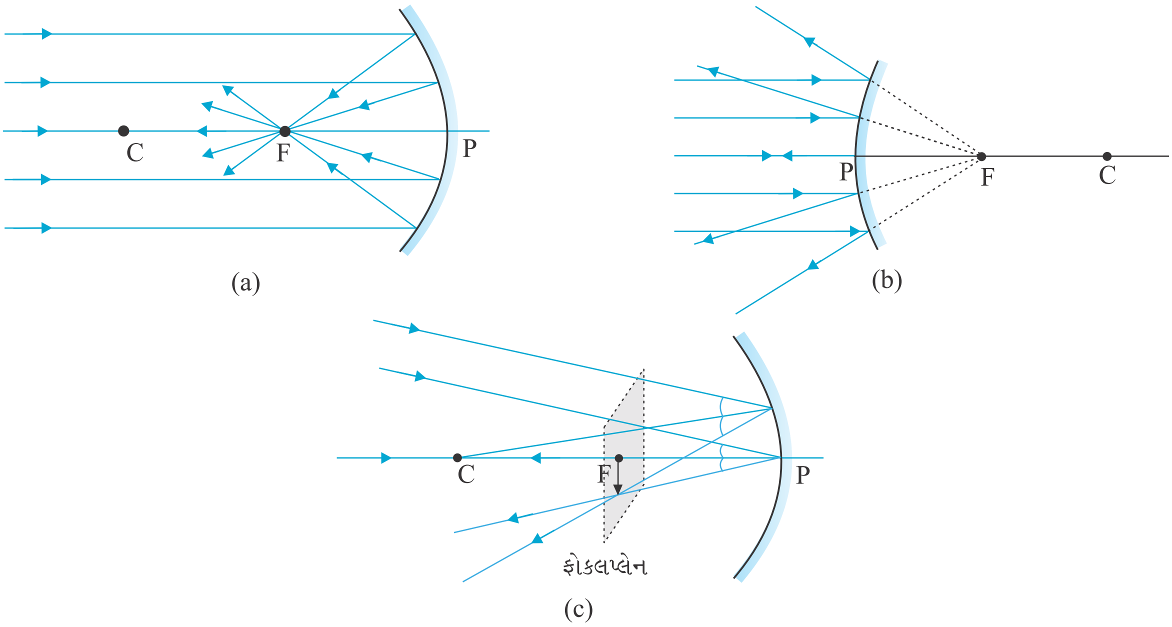


આકૃતિ 9.2 કાર્તેઝિય સંજ્ઞા પદ્ધતિ

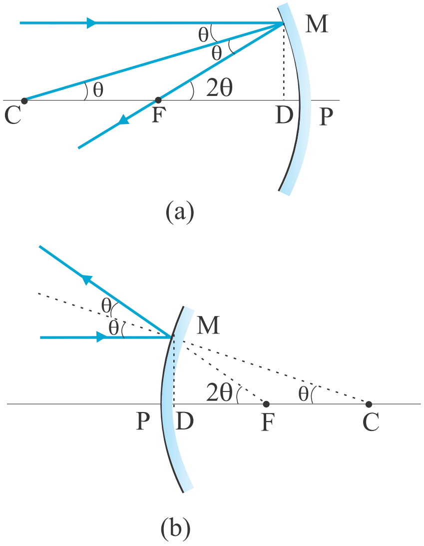
9.2.2 ગોળીય અરીસાની કેન્દ્રલંબાઈ (F) (Focal Length of Shperical Mirrors)

(a) અંતર્ગોળ અરીસા અને (b) બહિર્ગોળ અરીસા પર જ્યારે સમાંતર કિરણજુથ (કિરણાવલી) આપાત થાય છે ત્યારે શું થાય છે તે આકૃતિ 9.3માં બતાવ્યું છે. આપણે ધારીશું કે કિરણો *પેરેક્સિઅલ* (*Paraxial*) છે, અર્થાત્ અરીસાના ધ્રુવ Pની નજીક આપાત થયેલ છે અને મુખ્ય અક્ષ સાથે નાના ખૂણા બનાવે છે. અંતર્ગોળ અરીસા માટે મુખ્ય અક્ષને સમાંતર કિરણો પરાવર્તન પામી બિન્દુ F પાસે કેન્દ્રિત થાય છે [આકૃતિ 9.3(a)]. બહિર્ગોળ અરીસા માટે મુખ્ય અક્ષને સમાંતર કિરણો તેની મુખ્ય અક્ષ પરના બિંદુ F પાસેથી અપકેન્દ્રિત થતા જણાય છે [આકૃતિ 9.3(b)]. બિંદુ Fને અરીસાનું *મુખ્ય કેન્દ્ર* કહે છે. જો અરીસા પર આપાત થતા પેરેક્સિઅલ કિરણો મુખ્ય અક્ષને સમાંતર ન હોય [આકૃતિ 9.3(c)] તો તેઓ મુખ્ય કેન્દ્રમાંથી પસાર થતા અને મુખ્ય અક્ષને લંબ હોય તેવા સમતલમાંના બિંદુ પર કેન્દ્રિત થાય (અથવા અપકેન્દ્રિત થતા જણાતા હોય). આ સમતલને *ફોકલ પ્લેન* (*Focal Plane*) કહે છે.

મુખ્ય કેન્દ્ર (F) અને ધ્રુવ (P) વચ્ચેના અંતરને અરીસાની *કેન્દ્રલંબાઈ* કહે છે, તેને f વડે દર્શાવાય છે. હવે આપણે $f = R/2$ મેળવીશું, જ્યાં R એ અરીસાની વક્રતાત્રિજ્યા છે. આકૃતિ 9.4માં બતાવ્યા પ્રમાણે, આપાત કિરણનું અરીસાની સપાટી પરથી પરાવર્તન થાય છે.



આકૃતિ 9.3 અંતર્ગોળ અને બહિર્ગોળ અરીસાના મુખ્ય કેન્દ્ર



આકૃતિ 9.4 આપાત કિરણના પરાવર્તનથી રચાતી ભૂમિતિ (a) અંતર્ગોળ અરીસા માટે (b) બહિર્ગોળ અરીસા માટે

ધારો કે C અરીસાનું વક્રતાકેન્દ્ર છે. મુખ્યઅક્ષને સમાંતર કિરણ અરીસાની સપાટી પર M બિંદુ એ આપાત થાય છે. આથી CM એ M બિંદુ પાસે અરીસાની સપાટીને દોરેલો લંબ થશે. ધારો કે, આપાતકોણ θ છે, અને MD એ બિંદુ Mમાંથી મુખ્ય અક્ષ પર દોરેલો લંબ છે. તો,

$\angle MCP = \theta$ અને $\angle MFP = 2\theta$

હવે, $\tan\theta = \dfrac{MD}{CD}$ અને $\tan 2\theta = \dfrac{MD}{FD}$ (9.1)

પેરેક્સિઅલ કિરણો માટે θ અત્યંત સૂક્ષ્મ હોય તો

$\tan\theta \approx \theta$ અને $\tan 2\theta \approx 2\theta$.

સમીકરણ (9.1) પરથી,

$$\frac{MD}{FD} = \frac{2MD}{CD}$$

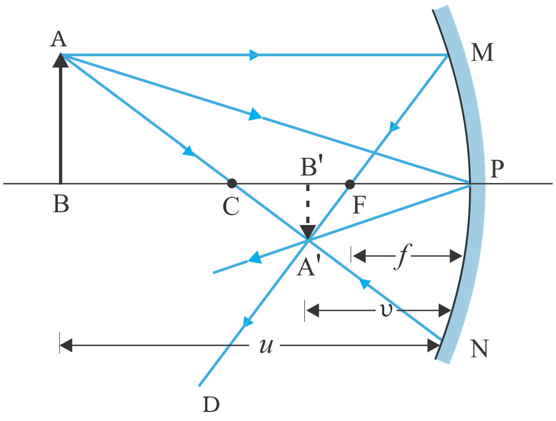
$$\therefore FD = \frac{CD}{2} \quad (9.2)$$

હવે θના નાના મૂલ્ય માટે બિંદુ D એ બિંદુ Pની ખૂબ જ નજીક છે. આથી, $FD = f$ અને $CD = R$. સમીકરણ (9.2) પરથી

$$f = R/2 \quad (9.3)$$

9.2.3 અરીસાનું સૂત્ર (The Mirror Equation)

જો કિરણો કોઈ એક બિંદુમાંથી ઉત્સર્જિત થઈ પરાવર્તન અને / અથવા વક્રીભવન પામી બીજા કોઈ બિંદુ પાસે કેન્દ્રિત થતાં હોય, તો તે બિંદુને પ્રથમ બિંદુનું *પ્રતિબિંબ* કહે છે. જો કિરણો તે બિંદુ પર ખરેખર કેન્દ્રિત થતાં હોય તો *પ્રતિબિંબ* સાચું (*Real*) અને કિરણો ખરેખર કેન્દ્રિત થતાં ન હોય પણ પાછળ લંબાવતાં તે બિંદુએથી અપકેન્દ્રિત થતાં હોય તેમ જણાય તો પ્રતિબિંબ *આભાસી* (*Virtual*) કહેવાય. આમ, પ્રતિબિંબ એ પરાવર્તન / અથવા વક્રીભવન દ્વારા વસ્તુ સાથે રચાતી બિંદુથી બિંદુની અનુરૂપતા (Point to Point Correspondence) છે.



આકૃતિ 9.5 અંતર્ગોળ અરીસા વડે રચાતા પ્રતિબિંબની કિરણાકૃતિ

સિદ્ધાંતમાં, આપણે વસ્તુના કોઈ એક બિંદુમાંથી ઉત્સર્જિત થતાં કોઈ બે કિરણો લઈ તેમનો ગતિપથ દોરી બંને કિરણોનું છેદનબિંદુ શોધી ગોળીય અરીસાથી થતા પરાવર્તનને લીધે મળતું પ્રતિબિંબ શોધી શકીએ. છતાં વ્યવહારમાં નીચે દર્શાવેલ કિરણો પૈકી કોઈ પણ બે કિરણો પસંદ કરવાનું અનુકૂળ છે :

(i) કોઈ બિંદુમાંથી મુખ્ય અક્ષને સમાંતર કિરણ તે પરાવર્તન પામી અરીસાના મુખ્ય કેન્દ્રમાંથી પસાર થાય છે.

(ii) અંતર્ગોળ અરીસા માટે વક્રતા કેન્દ્રમાંથી પસાર થતું કિરણ અને બહિર્ગોળ અરીસા માટે વક્રતા કેન્દ્રમાંથી પસાર થતું હોય તેવો ભાસ થતું કિરણ. તે અરીસા પરથી પરાવર્તન પામી એ જ માર્ગે પરત થતું હોય છે.

(iii) અંતર્ગોળ અરીસાના મુખ્ય કેન્દ્રમાંથી પસાર થતું (અથવા તેની તરફ જતું) કિરણ અથવા બહિર્ગોળ અરીસાના મુખ્ય કેન્દ્રમાંથી પસાર થતું હોય તેવો ભાસ થતું (અથવા તેની તરફ જતું) કિરણ પરાવર્તન પામી મુખ્ય અક્ષને સમાંતર થાય છે.

(iv) અરીસાના ધ્રુવ (P) સાથે કોઈ પણ કોણે આપાત થતું કિરણ. પરાવર્તિત કિરણ પરાવર્તનના નિયમોનું પાલન કરે છે.

આકૃતિ 9.5માં ત્રણ કિરણોને ધ્યાનમાં લીધા છે. AB વસ્તુ છે અને A'B' તેનું અંતર્ગોળ અરીસા વડે મળતું પ્રતિબિંબ (આ કિસ્સામાં સાચું) છે. આનો અર્થ એવો નથી કે, માત્ર ત્રણ કિરણોનું ઉત્સર્જન થાય છે, હકીકતમાં કોઈ પણ ઉદ્‌ગમમાંથી અનંત કિરણો બધી દિશામાં ઉત્સર્જાય છે. આમ બિંદુ Aમાંથી નીકળતાં બધાં કિરણો અંતર્ગોળ અરીસા પર પડીને પરાવર્તન બાદ બિંદુ A'માંથી પસાર થાય તો A' એ બિંદુ Aનું પ્રતિબિંબ છે.

હવે, આપણે વસ્તુઅંતર (u), પ્રતિબિંબઅંતર (υ) અને કેન્દ્રલંબાઈ (f) વચ્ચે સંબંધ દર્શાવતું સૂત્ર તારવીશું.

આકૃતિ 9.5 પરથી બે કાટકોણ ત્રિકોણો ΔA' B' F અને ΔMPF સમરૂપ ત્રિકોણો છે. (પેરેક્સિઅલ કિરણો માટે MPને મુખ્ય અક્ષ CPને લંબ સુરેખા ગણી શકાય) આથી,

$$\frac{B'A'}{PM} = \frac{B'F}{FP}$$

અથવા $\frac{B'A'}{BA} = \frac{B'F}{FP}$ $\quad (\because PM = BA)$ (9.4)

$\angle APB = \angle A'PB'$ હોવાથી કાટકોણ ત્રિકોણો ABP અને A'B'P પણ સમરૂપ છે.

$$\therefore \frac{B'A'}{BA} = \frac{B'P}{BP} \qquad (9.5)$$

સમીકરણ (9.4) અને (9.5)ને સરખાવતાં,

$$\frac{B'F}{FP} \quad \frac{B'P \quad FP}{FP} \quad \frac{B'P}{BP} \qquad (9.6)$$

સમીકરણ 9.6 અંતરોના માન વચ્ચે સંબંધ દર્શાવતું સૂત્ર છે. હવે સંજ્ઞા પદ્ધતિ લાગુ પાડીએ. આપણે જાણીએ છીએ કે વસ્તુથી અરીસા MPNની દિશામાં પ્રકાશ ગતિ કરે છે. આથી આ દિશા ધન ગણાશે. અહીં વસ્તુ AB અને તેનું પ્રતિબિંબ A'B' તથા મુખ્ય કેન્દ્ર F એ આપાત પ્રકાશની વિરુદ્ધ દિશામાં હોવાથી, આ ત્રણેયના અંતરો ઋણ ગણાશે.

$$B'P = -\upsilon,\ FP = -f,\ BP = -u$$

સમીકરણ (9.6) પરથી,

$$\frac{-\upsilon + f}{-f} = \frac{-\upsilon}{-u}$$

અથવા $\frac{\upsilon - f}{f} = \frac{\upsilon}{u}$

$$\frac{\upsilon}{f} = 1 + \frac{\upsilon}{u}$$

υ વડે ભાગતાં

$$\frac{1}{\upsilon} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f} \text{ મળે.} \qquad (9.7)$$

આ સમીકરણ (9.7)ને *અરીસાનું સૂત્ર* કહે છે.

અહીં બીજી ધ્યાનમાં લેવાની બાબત વસ્તુની ઊંચાઈની સરખામણીએ પ્રતિબિંબનું *પરિમાણ* છે. પ્રતિબિંબની ઊંચાઈ (h') અને વસ્તુની ઊંચાઈ (h)ના ગુણોત્તરને *રેખીય મોટવણી* (*Linear Magnification*) કહે છે.

$$\therefore\ m = \frac{h'}{h} \qquad (9.8)$$

આપણે અપનાવેલી સંજ્ઞા પદ્ધતિ મુજબ h અને h' ને ધન અથવા ઋણ લેવામાં આવે છે. ΔABP અને $\Delta A'B'P$ પરથી,

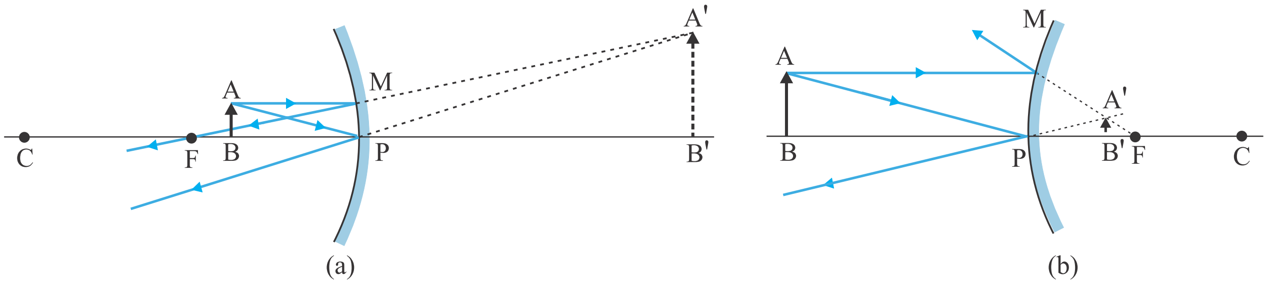
$$\frac{B'A'}{BA} \quad \frac{B'P}{BP}$$

$$\frac{-h'}{h} = \frac{-\upsilon}{-u} \quad \text{(સંજ્ઞા પદ્ધતિ મુજબ)}$$

આથી,

$$m = \frac{-h'}{h} = -\frac{\upsilon}{u} \qquad (9.9)$$

અહીં આપણે અરીસાનું સૂત્ર (સમીકરણ 9.7) અને મોટવણીનું સૂત્ર (સમીકરણ 9.9) અંતર્ગોળ અરીસા માટે વસ્તુનું પ્રતિબિંબ સાચું (વાસ્તવિક) અને ઊલટું હોય તે કિસ્સા માટે તારવ્યા છે. સંજ્ઞા પદ્ધતિનો યોગ્ય ઉપયોગ કરી આ સૂત્રો ગોળીય અરીસાથી પરાવર્તન માટે (અંતર્ગોળ તેમજ બહિર્ગોળ) તમામ કિસ્સાઓમાં સાચા કે આભાસી પ્રતિબિંબો માટે તારવી શકાય. આકૃતિ 9.6 અંતર્ગોળ તેમજ બર્હિગોળ અરીસા માટે આભાસી પ્રતિબિંબ કેવી રીતે મેળવી શકાય તે દર્શાવે છે. સમીકરણ (9.7) અને (9.9) આ કિસ્સાઓમાં પણ લાગુ પડે છે તે તમારે ચકાસવું જોઈએ.



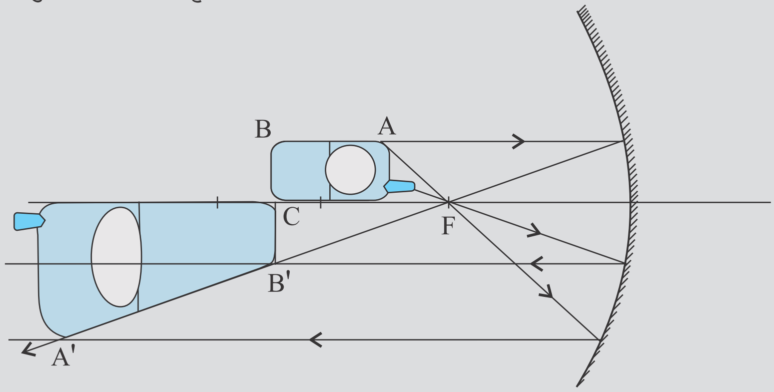
આકૃતિ 9.6 વસ્તુ P અને F વચ્ચે હોય ત્યારે (a) અંતર્ગોળ અરીસા વડે અને (b) બહિર્ગોળ અરીસા વડે રચાતા પ્રતિબિંબ

ઉદાહરણ 9.1 આકૃતિ 9.5માં દર્શાવેલ અંતર્ગોળ અરીસાની નીચેની અડધી, પરાવર્તક સપાટીને અપરાવર્તક દ્રવ્ય વડે ઢાંકી દીધી છે. આ અરીસાની સામે મૂકેલી વસ્તુના પ્રતિબિંબ પર શી અસર થશે ?

ઉકેલ આપ કદાચ વિચારતાં હશો કે હવે વસ્તુનું અડધું (Half) પ્રતિબિંબ જ રચાશે, પરંતુ એવું નથી બનતું. અરીસાના બાકીના ભાગના દરેક બિંદુ પાસે પરાવર્તનના નિયમો લાગુ પડતા હોવાથી પ્રતિબિંબ સમગ્ર વસ્તુનું મળશે. (હા, પ્રતિબિંબની તીવ્રતા જરૂર ઘટે છે. અહીં અડધી થાય છે.)

ઉદાહરણ 9.1

ઉદાહરણ 9.2 એક અંતર્ગોળ અરીસાની અક્ષ પર આકૃતિ (9.7)માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે એક મોબાઈલ ફોન મૂક્યો છે. યોગ્ય આકૃતિ દોરી તેનું પ્રતિબિંબ મેળવો. મોટવણી એક સમાન કેમ નથી તે સમજાવો. શું પ્રતિબિંબની વિકૃતિ અરીસાની સાપેક્ષે મોબાઈલના સ્થાન પર આધાર રાખે છે ?



આકૃતિ 9.7

ઉકેલ

મોબાઈલનું પ્રતિબિંબ મેળવવા માટે કિરણોનો માર્ગ આકૃતિ 9.7માં દર્શાવ્યા મુજબ મળે છે. મુખ્ય અક્ષને લંબ સમતલના ભાગનું પ્રતિબિંબ એજ સમતલમાં રચાય છે. તે તેટલા જ પરિમાણનું હશે. એટલે કે, B'C = BC. પ્રતિબિંબની મોટવણી એક સમાન કેમ નથી તે તમે જાતે સમજી શકો છો. હા અરીસાથી મોબાઈલનું અંતર બદલતાં પ્રતિબિંબ અલગ મળે.

ઉદાહરણ 9.2

ઉદાહરણ 9.3 એક અંતર્ગોળ અરીસાની વક્રતાત્રિજ્યા 15 cm છે. આ અરીસાની સામે વસ્તુને (i) 10 cm અને (i) 5 cm દૂર મૂકતાં રચાતાં પ્રતિબિંબનાં સ્થાન, પ્રકાર અને મોટવણી દરેક કિસ્સામાં મેળવો.

ઉકેલ

કેન્દ્રલંબાઈ $f = -15/2$ cm $= -7.5$ cm

(i) વસ્તુ અંતર $u = -10$ cm. સમીકરણ (9.7) મુજબ $\frac{1}{\upsilon} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$

$$\therefore \frac{1}{\upsilon} + \frac{1}{-10} = \frac{1}{-7.5}$$

અથવા $\frac{10 \times 7.5}{-2.5} = -30$ cm

આમ, પ્રતિબિંબ અરીસાથી 30 cm દૂર વસ્તુની બાજુએ જ છે.

મોટવણી, $m = \frac{-\upsilon}{u} = -\frac{(-30)}{(-10)} = -3$

પ્રતિબિંબ વાસ્તવિક, ઊલટું અને વિવર્ધિત (મોટું) મળે છે.

ઉદાહરણ 9.3

ઉદાહરણ 9.3

(ii) વસ્તુઅંતર $u = -5$ cm. સમીકરણ (9.7) મુજબ $\frac{1}{\upsilon} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$

$\therefore \quad \frac{1}{\upsilon} + \frac{1}{-5} = \frac{1}{-7.5}$

અથવા $\upsilon = \frac{5 \times 7.5}{(7.5-5)} = 15$ cm

આમ, પ્રતિબિંબ અરીસાથી 15 cm દૂર અરીસાની પાછળ મળશે. તે આભાસી પ્રતિબિંબ છે.

મોટવણી, $m = -\frac{\upsilon}{u} = -\frac{15}{(-5)} = 3$

પ્રતિબિંબ આભાસી, ચત્તુ અને વિવર્ધિત મળે છે.

ઉદાહરણ 9.4

ઉદાહરણ 9.4 ધારોકે, તમે પાર્ક કરેલી કારમાં બેઠા છો અને R = 2 m વાળા સાઈડ વ્યુ મીરરમાં એક વ્યક્તિને કાર તરફ દોડતી આવતી નીહાળો છો. જો વ્યક્તિની ઝડપ 5 m s^{-1} હોય તો જ્યારે તે અરીસાથી (a) 39 m, (b) 29 m, (c) 19 m અને (d) 9 m દૂર હોય ત્યારે તેનું પ્રતિબિંબ કેટલી ઝડપથી ગતિ કરતું દેખાશે ?

ઉકેલ અરીસાના સૂત્ર પરથી,

$$\upsilon = \frac{fu}{u-f}$$

બહિર્ગોળ અરીસા માટે, R = 2 m, $\therefore \; f = 1$ m

(a) $u = -39$ m માટે $\upsilon = \frac{(-39)\times 1}{-39-1} = \frac{39}{40}$ m

હવે દોડતી વ્યક્તિની અચળ ઝડપ = 5 m s^{-1}. આમ, 1 સેકન્ડના અંતે તે અરીસાથી $-39+5=-34$ m દૂર હશે.

આમ, પ્રતિબિંબ $\upsilon = \frac{34}{35}$ m મળશે.

આથી 1 s માં પ્રતિબિંબના સ્થાનમાં ફેરફાર

$$\frac{39}{40} \quad \frac{34}{35} \quad \frac{1365 \quad 1360}{1400} \quad \frac{1}{280} \text{ m}$$

આથી, દોડતી વ્યક્તિ જ્યારે 39 m અને 34 m વચ્ચે હોય ત્યારે તેની સરેરાશ ઝડપ 1/280 m s^{-1} થશે. આજ પ્રમાણે (b) 29 m, (c) 19 m અને (d) 9 m માટે ગણતરી કરી ઝડપ અનુક્રમે 1/150 m s^{-1}, 1/60 m s^{-1} અને 1/10 m s^{-1} મેળવી શકાય છે.

અહીં, દોડતી વ્યક્તિ અચળ ઝડપથી ગતિ કરે છે તેમ છતાં તે જેમ જેમ અરીસાની નજીક આવે છે તેમ તેમ તેની ઝડપ વધતી હોય એવું દેખાય છે. પાર્કિંગમાં સ્થિર કારમાં અથવા બસમાં બેઠેલી કોઈ પણ વ્યક્તિ આ ઘટના અનુભવી શકે છે. ગતિમાન વાહનોના કિસ્સામાં પણ આવી જ ઘટના અનુભવી શકાય, જો અરીસામાં દેખાતું પાછળનું વાહન અચળ ઝડપથી ગતિ કરતું હોય તો.

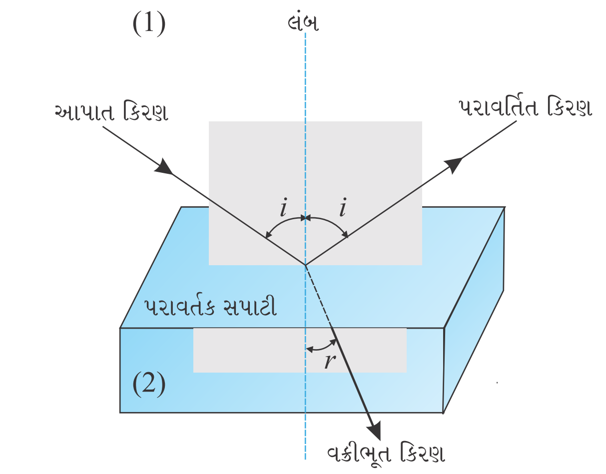
9.3 વક્રીભવન (REFRACTION)

જ્યારે પ્રકાશનું કિરણજુથ કોઈ એક માધ્યમમાંથી બીજા પારદર્શક માધ્યમમાં પ્રવેશે છે. ત્યારે આપાત પ્રકાશનો થોડો ભાગ પ્રથમ માધ્યમમાં પરાવર્તન પામે છે જ્યારે બાકીનો પ્રકાશ બીજા માધ્યમમાં પ્રવેશે છે. ત્રાંસા આપાત ($0 < i < 90^{\circ}$)થયેલા કિરણની દિશા, બે માધ્યમને છૂટી પાડતી સપાટી પાસેથી બદલાય છે. આ ઘટનાને *પ્રકાશનું વક્રીભવન* કહે છે. સ્નેલ નામના વિજ્ઞાનીએ પ્રાયોગિક રીતે વક્રીભવન માટે નીચેના નિયમો મેળવ્યાં.

(i) આપાત કિરણ, વક્રીભૂત કિરણ અને આપાતબિંદુએ આંતરસપાટીને લંબ એક જ સમતલમાં હોય છે.

(ii) આપેલાં બે માધ્યમો માટે આપાતકોણના sine અને વક્રીભૂતકોણના sineનો ગુણોત્તર અચળ રહે છે. યાદ રાખો કે, આપાતકોણ i અને વક્રીભૂતકોણ r એ અનુક્રમે આપાત કિરણે અને વક્રીભૂત કિરણે લંબ સાથે બનાવેલા કોણ છે.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} \qquad (9.10)$$



આકૃતિ 9.8 પ્રકાશનું વક્રીભવન અને પરાવર્તન

જ્યાં, અચળાંક n_{21}ને માધ્યમ-2નો માધ્યમ-1ની સાપેક્ષે *વક્રીભવનાંક* કહે છે. સમીકરણ 9.10 વક્રીભવન માટેનો જાણીતો સ્નેલનો નિયમ છે. આપણે એ નોંધીએ કે વક્રીભવનાંક n_{21} એ બે માધ્યમને જોડતી લાક્ષણિકતા છે. (જે તરંગલંબાઈ λ પર પણ આધાર રાખે છે.) પરંતુ આપાતકોણથી સ્વતંત્ર છે.

સમીકરણ 9.10 પરથી, જો $n_{21} > 1$, $r < i$ એટલે કે વક્રીભૂત કિરણ લંબ તરફ વળાંક લે છે. આવા કિસ્સામાં માધ્યમ-2ને માધ્યમ-1ની સાપેક્ષે *પ્રકાશીય ઘટ્ટ* (અથવા ટૂંકમાં *ઘટ્ટ*) માધ્યમ કહે છે.

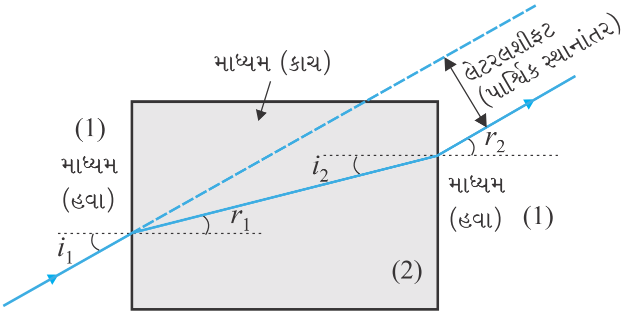
જો $n_{21} < 1$, તો $r > i$, વક્રીભૂત કિરણ લંબથી દૂર તરફ વળાંક લે છે. અહીં આપાત કિરણ પ્રકાશીય ઘટ્ટ માધ્યમમાં છે અને તે પાતળા માધ્યમમાં વક્રીભવન પામે છે.

નોંધ : *પ્રકાશીય ઘનતા અને દળ-ઘનતા વચ્ચે ગૂંચવણ થવી ન જોઈએ. દળ ઘનતા એકમ કદનું દળ દર્શાવે છે. એવું શક્ય છે કે પ્રકાશીય ઘટ્ટ માધ્યમની દળ-ઘનતા એ પ્રકાશીય પાતળા માધ્યમ કરતાં ઓછી હોય. (પ્રકાશીય ઘનતા એ બંને માધ્યમમાં પ્રકાશના વેગનો ગુણોત્તર છે) દા. ત. ટર્પેન્ટાઈન અને પાણી. પાણી કરતાં ટર્પેન્ટાઈનની પ્રકાશીય ઘનતા વધુ છે પરંતુ તેની દળ ઘનતા પાણીની દળ ઘનતા કરતાં ઓછી છે.*

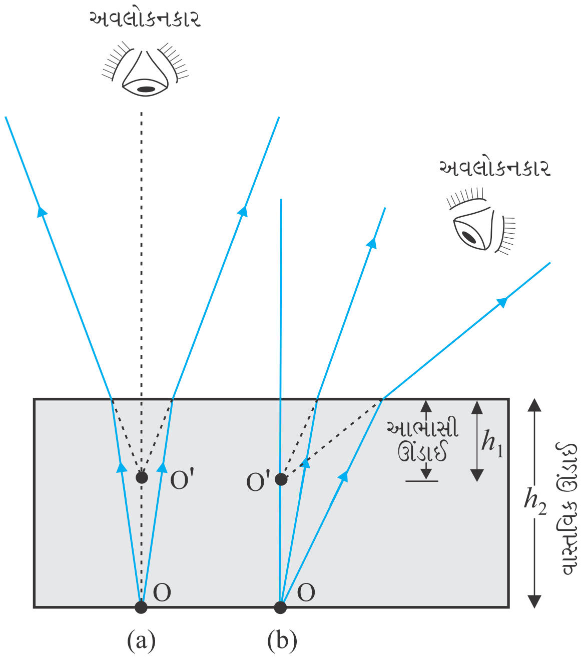
જો n_{21}= માધ્યમ-2નો માધ્યમ-1ને સાપેક્ષ વક્રીભવનાંક અને n_{12} = માધ્યમ-1નો માધ્યમ-2ને સાપેક્ષ વક્રીભવનાંક હોય તો,

$$n_{12} = \frac{1}{n_{21}} \qquad (9.11)$$

વધુમાં n_{32} = માધ્યમ-3નો માધ્યમ-2ની સાપેક્ષે વક્રીભવનાંક હોય તો $n_{32} = n_{31} \times n_{12}$ જ્યાં n_{31} માધ્યમ-3નો માધ્યમ-1ને સાપેક્ષ વક્રીભવનાંક વક્રીભવનના નિયમો પરથી કેટલાક પ્રાથમિક પરિણામો મેળવી શકાય છે.



આકૃતિ 9.9 સમાંતર બાજુઓ ધરાવતાં સ્લેબમાંથી વક્રીભવન પામતાં કિરણ માટે લેટરલ શીફ્ટ.

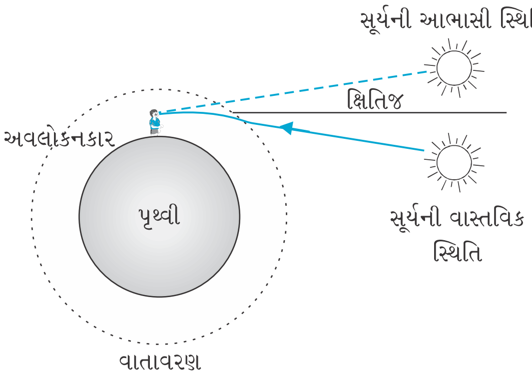


આકૃતિ 9.10 (a) લંબરૂપે અને (b) ત્રાંસી રીતે જોતાં મળતી આભાસી ઊંડાઈ

લંબચોરસ સ્લેબ માટે બે આંતર સપાટી (હવા-કાચ અને કાચ-હવા) આગળ વક્રીભવનની ઘટના ઉદ્‌ભવે છે. આકૃતિ 9.9 પરથી સરળતાથી સમજી શકાય છે કે $r_2 = i_1$ અર્થાત્ નિર્ગમન કિરણ આપાત કિરણને સમાંતર છે. આમ આપાત કિરણનું વિચલન થતું નથી. પરંતુ, તે આપાત કિરણને સાપેક્ષ લેટરલ શીફ્ટ (પાર્શ્વિક સ્થાનાંતર) અનુભવે છે. બીજું જાણીતું અવલોકન એ છે કે પાણીથી ભરેલી ટાંકીના તળિયાને લંબરૂપે જોતાં, તેનું તળિયું ઊંચકાયેલું (Raised) જોવા મળે છે (આકૃતિ 9.10). લંબદિશાની નજીકથી જોતા એવું દર્શાવી શકાય કે, આભાસી ઊંડાઈ (h_1) એ વાસ્તવિક ઊંડાઈ (h_2) અને માધ્યમ (પાણી)ના વક્રીભવનાંકના ગુણોત્તર જેટલી હોય છે.

વાતાવરણમાં પ્રકાશના વક્રીભવનને કારણે ઘણી રસપ્રદ ઘટનાઓ બને છે. દા.ત., વાતાવરણમાંથી પ્રકાશના વક્રીભવનને લીધે ખરેખરા સૂર્યોદયના સમય કરતાં સૂર્ય થોડો વહેલો દેખાય છે અને સૂર્યાસ્ત પછી પણ થોડા સમય સુધી દેખાય છે, (આકૃતિ 9.11). ખરેખરો સૂર્યોદય એટલે સૂર્ય ક્ષિતિજ (Horizon)ને ખરેખર ઓળંગે તે. આ અસરને દર્શાવવા માટે આકૃતિ ઘણી મોટી કરીને દર્શાવેલ છે.

હવાનો શૂન્યાવકાશને સાપેક્ષ વક્રીભવનાંક 1.00029 છે. આના કારણે સૂર્યની દિશામાં આભાસી શીફ્ટ (સ્થાનાંતર) મળે છે જે આશરે 0.5° જેટલું હોય છે અને અનુરૂપ સમયનો તફાવત 2 મિનિટ છે. (જુઓ ઉદાહરણ 9.5) આમ, આભાસી સૂર્યોદય અને ખરેખરા સૂર્યોદય (અથવા આભાસી સૂર્યાસ્ત અને ખરેખરા સૂર્યાસ્ત) વચ્ચેનો સમય તફાવત 2 મિનિટ મળે છે (આકૃતિ 9.11). સૂર્યોદય તેમજ સૂર્યાસ્ત સમયે ચપટો (Flattened) દેખાતો સૂર્ય (Oval Shape) પણ આ જ ઘટનાના કારણે છે.



આકૃતિ 9.11 વાતાવરણીય વક્રીભવનને લીધે વહેલો સૂર્યોદય અને મોડો સૂર્યાસ્ત

ઉદાહરણ 9.5

ઉદાહરણ 9.5 પૃથ્વીને પોતાની ધરીને અનુલક્ષીને એક પરિભ્રમણ કરતાં 24 h લાગે છે. પૃથ્વી પરથી સૂર્યને જોતાં તેની 1° જેટલી શીફ્ટ માટે તેને કેટલો સમય લાગશે ?

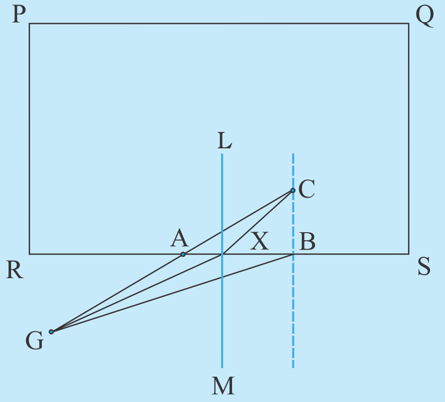
ઉકેલ

360° શીફ્ટ થતાં લાગતો સમય = 24 h

1° શીફ્ટ માટેનો સમય = $(1 \times 24/360)\ h = 4$ min

તરણકુંડમાં ડૂબતો બાળક, લાઈફ ગાર્ડ અને સ્નેલનો નિયમ

આકૃતિમાં PQSR એક લંબચોરસ તરણકુંડ છે. તરણકુંડની બહાર નજીકમાં G બિંદુ પાસે રહેલો જીવનસંરક્ષક (લાઈફ ગાર્ડ) તરણકુંડમાં C બિંદુ પાસે એક બાળક પાણીમાં ડૂબી રહ્યો હોવાનું નોંધે છે. ગાર્ડ આ બાળકને જોઈ તેની પાસે ઓછામાં ઓછા સમયમાં પહોંચવા માંગે છે. G અને C વચ્ચેની તરણકુંડની બાજુ SR છે. તેણે આકૃતિમાં દર્શાવ્યા પ્રમાણે G અને C વચ્ચેનો સુરેખમાર્ગ GAC પર જવું કે GBC માર્ગે કે જેમાં પાણીમાંનો પથ BC ટૂંકામાં ટૂંકો હોય તે માર્ગે જવું અથવા કોઈ બીજા GXC માર્ગે જવું જોઈએ ? આ ગાર્ડની જમીન પર દોડવાની ઝડપ υ_1 તેની પાણીમાં તરવાની ઝડપ υ_2 કરતાં વધારે છે, તે જાણે છે.



ધારોકે ગાર્ડ બિંદુ X પાસેથી તરણકુંડમાં દાખલ થાય છે. જો $GX = l_1$ અને $XC = l_2$ હોય તો G થી C સુધી પહોંચતા લાગતો સમય

$$t = \frac{l_1}{\upsilon_1} + \frac{l_2}{\upsilon_2}$$

આ સમયને લઘુત્તમ બનાવવા તેનું વિકલન (Xના યામને અનુલક્ષીને) કરવું પડે અને બિંદુ X એવું શોધી કાઢવું પડે કે જ્યાં સમય t લઘુત્તમ થાય. આવી ગણતરીઓ (અહીં આપણે તે છોડી દઈએ છીએ) દર્શાવે છે કે બિંદુ X એવી જગ્યાએ મળે કે જ્યાં સ્નેલના નિયમનું પાલન થાય. આ સમજવા માટે, SR બાજુને X આગળ લંબ LM દોરો. $\angle GXM = i$, $\angle CXL = r$, તો એમ જણાય છે કે t ત્યારે જ લઘુત્તમ મળે કે જ્યારે

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} \text{ થાય.}$$

પ્રકાશના કિસ્સામાં υ_1/υ_2 એ પ્રકાશના શૂન્યાવકાશમાંના વેગ અને માધ્યમમાંના વેગનો ગુણોત્તર છે જે માધ્યમનો વક્રીભવનાંક n છે.

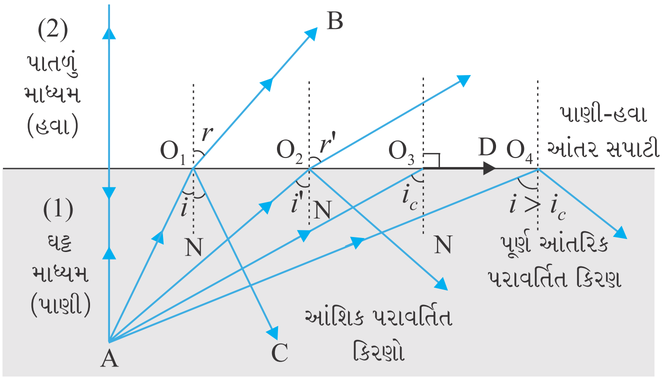
આમ, તરંગ હોય યા કણ કે કોઈ વ્યક્તિ, જો તેણે લઘુત્તમ સમય લેવો હોય તો બે માધ્યમ અને તેમાં બે વેગ સંકળાયેલા હોય ત્યારે સ્નેલના નિયમનું પાલન થવું જોઈએ.

9.4 પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન (Total Internal Reflection)

જ્યારે પ્રકાશનું કિરણ પ્રકાશીય ઘટ્ટ માધ્યમમાંથી પ્રકાશીય પાતળા માધ્યમમાં પ્રવેશે છે. ત્યારે તેનું, બંને માધ્યમોને છૂટી પાડતી સપાટી આગળ તે જ માધ્યમમાં તેનું આંશિક પરાવર્તન અને બીજા માધ્યમમાં આંશિક પારગમન થાય છે. આ પરાવર્તનને *આંતરિક પરાવર્તન* કહે છે.

જ્યારે પ્રકાશનું કિરણ પ્રકાશીય ઘટ્ટ માધ્યમમાંથી પ્રકાશીય પાતળા માધ્યમમાં પ્રવેશે છે ત્યારે તે લંબથી દૂર તરફ વિચલન પામે છે. દા.ત. આકૃતિ 9.12માં દર્શાવેલ કિરણ AO_1B. આપાતકિરણ AO_1નું આંશિક પરાવર્તન (O_1C) અને આંશિક વક્રીભવન (O_1B) થાય છે.

આપાતકોણ (i) કરતાં વક્રીભૂતકોણ (r) મોટો છે. હવે આપાતકોણનું મૂલ્ય વધારતાં વક્રીભૂતકોણ પણ વધે છે; આવું AO_3 કિરણ સુધી બને છે કે જ્યાં વક્રીભૂતકોણ $\pi/2$ બને છે. અહીં વક્રીભૂતકિરણ ખૂબ વળીને બંને માધ્યમોને છૂટી પાડતી સપાટીને સમાંતર થાય છે. આ કિરણ AO_3D વડે દર્શાવ્યું છે, (આકૃતિ 9.12). જો આપાતકોણનું મૂલ્ય હજી પણ વધારવામાં આવે (દા.ત. કિરણ AO_4) તો તેનું વક્રીભવન શક્ય નથી અને તેનું સંપૂર્ણ પરાવર્તન જ થાય છે. જેને *પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન* કહે છે. સામાન્ય રીતે જ્યારે પ્રકાશનું પરાવર્તન થાય છે ત્યારે તેનો કેટલોક અંશ પારગમન પામે છે. આથી જ પરાવર્તક સપાટી ગમે



આકૃતિ 9.12 ઘટ્ટ માધ્યમ (પાણી)માં રાખેલ બિંદુ Aમાંથી પાતળા માધ્યમ (હવા)ની સપાટીએ જુદા-જુદા કોણે આપાત થતાં કિરણોનું પરાવર્તન અને પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન

તેટલી લીસી હોય તો પણ પરાવર્તિત કિરણ ઓછી તીવ્રતાવાળું હોય છે. પરંતુ, જ્યારે આપાત કિરણનું પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય છે ત્યારે પ્રકાશનું પારગમન થતું નથી.

વક્રીભૂતકોણ 90° બને ત્યારે અનુરૂપ આપાતકોણ (આકૃતિમાં $\angle AO_3N$)ને આપેલા માધ્યમોની જોડ માટેનો *ક્રાંતિકોણ* (i_c) કહે છે. સ્નેલના નિયમ (સમીકરણ 9.10) પરથી કહી શકાય કે જો વક્રીકારક માધ્યમનો સાપેક્ષ વક્રીભવનાંક 1 કરતાં ઓછો હોય તો, sin r નું મહત્તમ મૂલ્ય એક હોવાથી, સ્નેલના નિયમના પાલન માટે sin i ના મૂલ્યને એક ઉચ્ચ સીમા હોય છે. એટલે કે $i = i_c$, કે જેથી

$$\sin i_c = n_{21} \qquad (9.12)$$

i_c કરતાં i ના મોટા ($i > i_c$) મૂલ્યો માટે સ્નેલનો વક્રીભવનનો નિયમ પળાતો નથી અને તેથી વક્રીભવન શક્ય નથી. ઘટ્ટ માધ્યમ-1નો પાતળા માધ્યમ-2ને સાપેક્ષ વક્રીભવનાંક $n_{12} = 1/\sin i_c$. કેટલાક માધ્યમ માટે ક્રાંતિકોણના મૂલ્યો નીચેના કોષ્ટક 9.1માં દર્શાવ્યા છે.

કોષ્ટક 9.1 હવાની સાપેક્ષે કેટલાક માધ્યમોના ક્રાંતિકોણ

દ્રવ્ય માધ્યમ	વક્રીભવનાંક	ક્રાંતિકોણ (i_c)
પાણી	1.33	48.75°
ક્રાઉનકાચ	1.52	41.14°
ઘટ્ટ ફ્લિન્ટ કાચ	1.62	37.31°
ડાયમંડ (હીરો)	2.42	24.41°

પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનનું નિર્દેશન

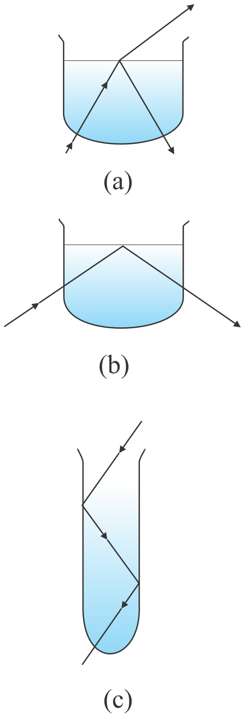
આજકાલ ખૂબ જ સરળ રીતે પ્રાપ્ત થઈ શકે છે તે લેસર ટોર્ચ કે પોઈન્ટરની મદદથી બધી પ્રકાશીય ઘટનાઓ ખૂબ જ સરળતાથી દર્શાવી શકાય છે. એક કાચના બીકરમાં સ્વચ્છ પાણી ભરો. એક સાબુ વડે આ પાણીને થોડો સમય હલાવો કે જેથી એ થોડું કલુષિત (ડહોળું) બને. લેસર કિરણને આ કલુષિત પાણી પર આપાત કરો. તમે પાણીમાં તેનો પ્રકાશિત માર્ગ જોઈ શકશો.

બીકરના તળિયાના ભાગ પરથી લેસર કિરણ એવી રીતે આપાત કરો કે તે બીજા છેડે પાણીની સપાટી પર આપાત થાય. શું તમે આપાત કિરણનું આંશિક પરાવર્તન (ટેબલ પર એક પ્રકાશીત ટપકું મળશે.) અને આંશિક વક્રીભવન (છત પર પ્રકાશિત ટપકું મળશે) જોઈ શકો છો [આકૃતિ 9.13(a)] ?

હવે, બીકરની એક બાજુથી લેસર કિરણ એવી રીતે આપાત કરો કે તે પાણીની ઉપરની સપાટી પર વધુ ત્રાંસુ આપાત થાય [આકૃતિ 9.13 (b)]. ધીમે ધીમે લેસર કિરણની દિશા બદલી એવી ગોઠવી એવો કોણ શોધો કે જેથી પાણીની સપાટીની ઉપરનું વક્રીભવન અદૃશ્ય બને અને આપાતકિરણનું પાણીમાં જ પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય. આ પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનનું સૌથી સરળ નિર્દેશન છે.

આ પાણીને કાચની લાંબી નળીમાં ભરી આકૃતિ [9.13(c)]માં બતાવ્યા પ્રમાણે નળીની ઉપરની બાજુથી લેસર કિરણ આપાત કરો. લેસર કિરણની દિશા એવી ગોઠવો કે નળી દિવાલ પર આપાત થાય ત્યારે દરેક વખતે તે પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન પામે. ઓપ્ટીકલ ફાઈબરમાં બરોબર આ જ રીતે અનેકવાર પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય છે.

લેસર કિરણ ક્યારેય તમારી આંખમાં સીધું કે અન્યના ચહેરા પર આપાત ન થાય તેની કાળજી રાખજો.

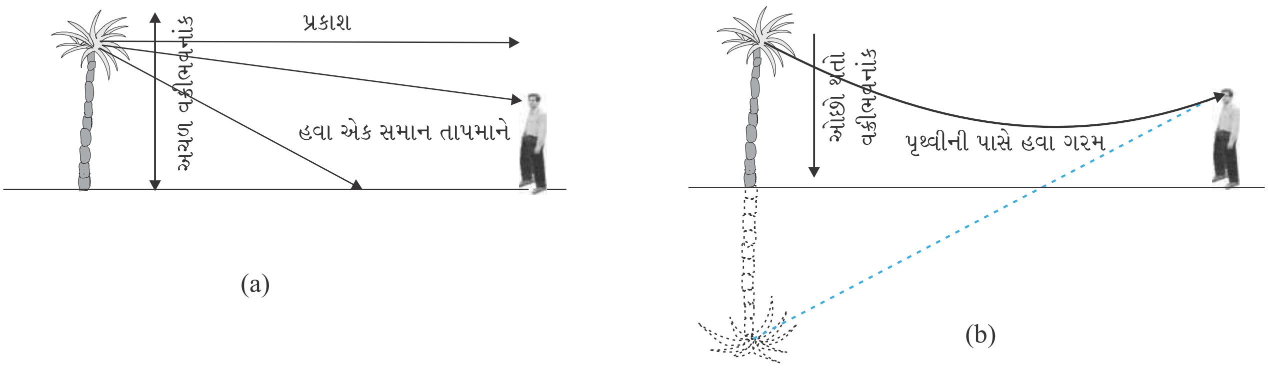


આકૃતિ 9.13 પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનનું નિર્દેશન (કાચનું બીકર ખૂબ જ પાતળું હોવાના કારણે તેમાં થનાર અપવર્તનને નગણ્ય માનવામાં આવે છે.)

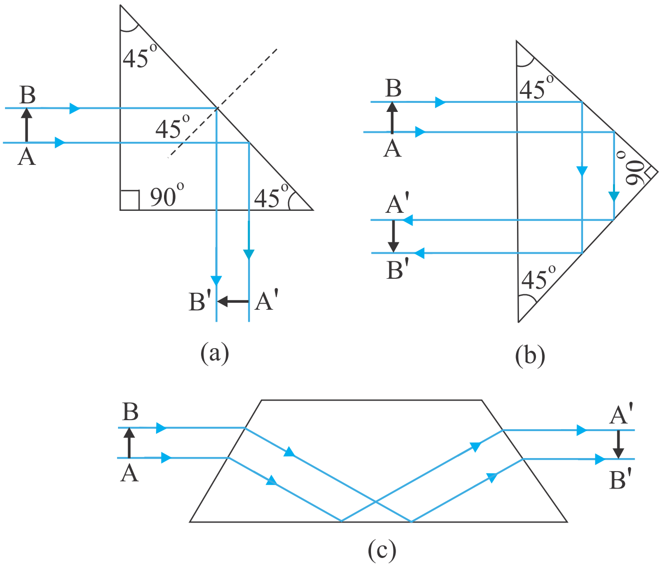
9.4.1 કુદરતમાં પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન અને આ ઘટનાના પ્રૌદ્યોગીકી ઉપયોગો (Total Internal Reflection in Nature and its Technological Applications)

(i) *મરીચિકા (Mirage)* **:** ઉનાળાની ગરમીમાં જમીનનાં સંપર્કમાં રહેલ હવા ઉપરના સ્તરની હવા કરતાં વધુ ગરમ થાય છે. હવાનો વક્રીભવનાંક તેની ઘનતા વધે તેમ વધે છે. વધુ ગરમ હવા ઓછી ઘટ્ટ હોય છે અને પાતળી હવા કરતાં તેનો વક્રીભવનાંક ઓછો હોય છે. જો હવાના પ્રવાહો નાના હોય એટલે કે હવા સ્થિર હોય તો જુદા જુદા સ્તરોની પ્રકાશીય ઘનતા ઊંચાઈ સાથે વધે છે. આથી કોઈ ઝાડ જેવા ઊંચા પદાર્થ પરથી આવતું કિરણ જમીન તરફ જતાં સતત ઘટતા વક્રીભવનાંક વાળા માધ્યમમાંથી પસાર થાય છે. આમ આવા પદાર્થમાંથી આવતું કિરણ સતત રીતે લંબથી દૂર તરફ વિચલન અનુભવતું જાય છે અને જમીનની નજીકની હવા માટે આપાતકોણ ક્રાંતિકોણ કરતાં વધે ત્યારે પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન પામે છે. આ આકૃતિ 9.14(b)માં દર્શાવ્યું છે. દૂરના નિરીક્ષકને પ્રકાશ ક્યાંક જમીનની નીચેના ભાગ પરથી આવતો હોય તેવો ભાસ થાય છે અને જમીન પર પાણીનું ખાબોચીયું હોય અને તેમાં ઝાડનું પ્રતિબિંબ રચાતું હોય તેવું માની લે છે. દૂરના ઊંચા પદાર્થોનાં આવાં ઊંધા પ્રતિબિંબો નિરીક્ષકને પ્રકાશીય ભ્રમણમાં નાંખી દે છે. આ ઘટનાને *મરીચિકા* કહે છે. ગરમ રણ પ્રદેશમાં આવી મરીચિકા દેખાવાનું સામાન્ય છે. તમે કદાચ એ નોંધ્યું હશે કે, ગરમીના દિવસે બસમાં કે કારમાં જતા ખાસ કરીને હાઈવે પર દૂરના રસ્તાનો ભાગ ભીનો દેખાય છે. પરંતુ તે સ્થળે પહોંચતાં કોઈ ભીનાશ જણાતી નથી. આ પણ મરીચિકાને લીધે છે.

(ii) *હીરો(ડાયમંડ)* **:** તે ચળકાટ માટે પ્રસિદ્ધ છે. તેના આ ચળકાટનું મુખ્ય કારણ, તેમાં બનતી પ્રકાશના પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનની ઘટના છે. હીરા અને હવાના આંતરપૃષ્ઠ માટે વક્રીભવનાંકનું મૂલ્ય ઘણું મોટું અને ક્રાંતિકોણ ઘણો નાનો ($\cong 24.4^{\circ}$ જેટલો) છે. આ કારણોસર હીરા પર આપાત થતાં પ્રકાશનું, તેની અંદર પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થવાની ઘણી શક્યતા છે. કુદરતમાંથી પ્રાપ્ત થતાં ડાયમંડ (હીરા) ભાગ્યે જ બહુ ઝળહળાટ દર્શાવે છે. ડાયમંડ કટરની કુશળતા ડાયમંડને આટલા બધા ઝળહળતા બનાવે છે. ડાયમંડને યોગ્ય રીતે ઘસીને અનેક પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનની ઘટના શક્ય બનાવાય છે.



આકૃતિ 9.14 (a) જ્યારે જમીન પાસેની હવા અને ઉપરની હવા સમાન તાપમાને હોય ત્યારે અવલોકનકર્તાને વૃક્ષ એ જે સ્થાને હોય ત્યારે ત્યાં જ દેખાશે. (b) જ્યારે જમીનની સપાટીની નજીકની હવા પ્રમાણમાં ગરમ હોય અને તેનું તાપમાન હવાનાં સ્તરો સાથે બદલાતું હોય ત્યારે દૂરના વૃક્ષ પરથી આવતું કિરણ પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન અનુભવે છે અને વૃક્ષનું આભાસી પ્રતિબિંબ, વૃક્ષ પાણીના ખાબોચીયા નજીક હોય તેવો ભાસ અવલોકનકારને કરાવે છે.

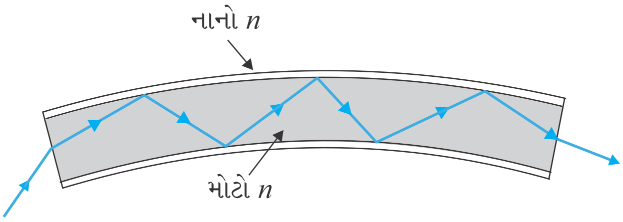


આકૃતિ 9.15 કિરણોને 90° અથવા 180°ના કોણે વાંકાવાળે (Bend) અથવા પ્રતિબિંબને સાઈઝ બદલ્યા વિના ઉલટું કરે તેવી ખાસ રચના ધરાવતાં પ્રિઝમ બનાવવા પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનનો ઉપયોગ

(iii) *પ્રિઝમ* : પ્રકાશને 90° કે 180° નું આવર્તન કરાવતા પ્રિઝમ પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનની ઘટનાનો ઉપયોગ કરે છે [આકૃતિ 9.15(a) અને (b)]. આવા પ્રિઝમનો ઉપયોગ પ્રતિબિંબનાં પરિમાણમાં ફેરફાર કર્યા વિના પ્રતિબિંબને ઊલટાવવામાં પણ થાય છે [આકૃતિ 9.15(c)]. પ્રથમ બે કિસ્સા માટે પ્રિઝમના દ્રવ્યનો ક્રાંતિકોણ i_c , 45° કરતાં નાનો હોવો જરૂરી છે. કોષ્ટક 9.1 પરથી જોઈ શકાય છે કે સાદા ક્રાઉન કાચ તથા ઘટ્ટ ફ્લિન્ટ કાચ બંને માટે તે શક્ય છે.

(iv) *ઑપ્ટિકલ ફાઈબર્સ (Optical Fibres)* : વર્તમાન સમયમાં શ્રાવ્ય અને દ્રશ્ય સંકેતો (ઑડિયો અને વિડિયો સિગ્નલો)નું લાંબા અંતર સુધી પ્રસારણ કરવા ઑપ્ટિકલ ફાઈબર્સનો વિસ્તૃત ઉપયોગ થાય છે. ઑપ્ટિકલ ફાઈબરમાં પણ પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનની ઘટનાનો જ ઉપયોગ થાય છે. ઑપ્ટિકલ ફાઈબર ઉચ્ચ ગુણવત્તાવાળા ફ્યુઝ્ડ ગ્લાસ/ક્વાર્ટ્ઝમાંથી બનાવવામાં આવે છે. દરેક ફાઈબર ચોક્કસ ગર્ભ (Core) અને ચોક્કસ આવરણ (Cladding) ધરાવે છે. ગર્ભ (કૉર)ના દ્રવ્યનો વક્રીભવનાંક, આવરણ (ક્લેડિંગ)ના દ્રવ્યના વક્રીભવનાંક કરતાં મોટો હોય છે.

જ્યારે ફાઈબરના એક છેડેથી પ્રકાશનું સિગ્નલ યોગ્ય કોણે આપાત થાય છે ત્યારે ફાઈબરની લંબાઈ પર તેનું વારંવાર પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય છે અને છેવટે તે બીજે છેડેથી નિર્ગમન પામે છે (આકૃતિ 9.16). અહીં, પ્રકાશનું પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થવાથી તેની તીવ્રતામાં કોઈ નોંધનીય ઘટાડો થતો નથી. ઑપ્ટિકલ ફાઈબરની રચના એવી કરવામાં આવે છે કે અંદરની એક બાજુ પર આપાત થતો પ્રકાશ સામેની બાજુ પર ક્રાંતિકોણ કરતાં મોટા કોણે આપાત થાય. ફાઈબર વળેલા હોવા છતાં પ્રકાશ તેની લંબાઈ પર સરળતાથી ગતિ કરી શકે છે. આમ, ઑપ્ટિકલ ફાઈબરનો ઉપયોગ ઑપ્ટિકલ પાઈપ તરીકે કરી શકાય છે.



આકૃતિ 9.16 પ્રકાશ ઑપ્ટિકલ ફાઈબરમાંથી પસાર થાય છે ત્યારે તે એક પછી એક એમ સતત પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન અનુભવે છે.

ઑપ્ટિકલ ફાઈબર્સનો જથ્થો (Bundle) બનાવી તેનો વિવિધ ઉપયોગ કરવામાં આવે છે. વિદ્યુત સંકેતો (Electrical Signals) ટ્રાન્સડ્યુસર્સની મદદથી પ્રકાશમાં રૂપાંતરિત કરવામાં આવે છે તેમને પ્રસારિત કરવામાં અને ઝીલવા (Receive)માં ઑપ્ટિકલ ફાઈબર્સ ખૂબ જ બહોળા પ્રમાણમાં ઉપયોગી છે. આ વિદ્યુત સંકેતોને યોગ્ય ટ્રાન્સડ્યુસર (Transducer)ની મદદથી પ્રકાશમાં રૂપાંતરિત કરવામાં આવે છે. સ્વાભાવિક રીતે જ ઑપ્ટિકલ ફાઈબર ઑપ્ટિકલ સિગ્નલોનું પણ પ્રસારણ (Transmission) કરવામાં વાપરી શકાય છે. ઉદાહરણ તરીકે, ઑપ્ટિકલ ફાઈબરને પ્રકાશીય નળી તરીકે વાપરી

અન્નનળી, જઠર અને આંતરડા જેવા શરીરના આંતરિક અવયવોની દૃશ્ય તપાસ થઈ શકે છે. બહુ સામાન્ય બનેલા ડેકોરેટીવ લેમ્પ તમે જોયા હશે, જેમાં પ્લાસ્ટિકના ફાઈબરોના મુક્ત છેડા ફૂવારાના આકાર બનાવે છે. જેનો એક છેડો મુક્ત અને બીજો છેડો લેમ્પ સાથે જોડેલો હોય છે. હવે સ્વીચ ઓન કરતાં દરેક ફાઈબરમાં પ્રકાશ તળીયેથી પસાર થઈ ફાઈબરના છેડે પ્રકાશિત ટપકું રચે છે. આ પ્રકારના ડેકોરેટીવ લેમ્પમાં વપરાતા ફાઈબર ઑપ્ટિકલ ફાઈબર જ છે.

ઑપ્ટિકલ ફાઈબર બનાવવાની મુખ્ય જરૂરિયાત એ છે કે, પ્રકાશ તેમાં ખૂબ જ લાંબા અંતર સુધી મુસાફરી કરે તેમ છતાં ખુબ જ ઓછા પ્રમાણમાં પ્રકાશનું શોષણ થાય. તેનું શુદ્ધિકરણ અને ચોક્કસ પ્રકારના ક્વાર્ટ્ઝ જેવા દ્રવ્ય બનાવવાથી આવું શક્ય બને છે. સીલીકા ગ્લાસ ફાઈબરમાં પ્રકાશ 1 km સુધી પ્રસરણ પામે છે. ત્યારે 95 %થી વધારે પ્રકાશનું પ્રસરણ કરી શકાય છે.

(આની સરખામણીએ જો બારીના કાચના 1 km જાડાઈના બ્લૉકનો ઉપયોગ કરીએ તો શું થાય તે તમે વિચારી જુઓ).

9.5 ગોળીય સપાટીઓ આગળ અને લેન્સ વડે થતું વક્રીભવન (Refraction at Spherical Surfaces and by Lenses)

અત્યાર સુધી આપણે સમતલ સપાટી પાસેથી થતાં વક્રીભવનની ચર્ચા કરી. હવે આપણે બે પારદર્શક માધ્યમોના ગોળીય આંતરપૃષ્ઠ આગળ થતું વક્રીભવન ધ્યાનમાં લઈશું. વક્રસપાટીના અત્યંત નાના ભાગને સમતલ ગણી, દરેક બિંદુ પાસે વક્રીભવનના તે જ નિયમો લાગુ પાડી શકાય છે. વક્ર અરીસાથી થતા પરાવર્તનની જેમ જ આપાત બિંદુએ દોરેલો લંબ તે બિંદુએ ગોળીય સપાટીને દોરેલો સ્પર્શકને લંબ છે. તેથી અહીં પણ તે વક્રતાકેન્દ્રમાંથી પસાર થાય છે. પ્રથમ માત્ર એક વક્રીભવનકારક સપાટીથી થતા વક્રીભવનની ચર્ચા કરીશું, બાદમાં પાતળા લેન્સ વડે થતાં વક્રીભવનની ચર્ચા કરીશું. બે વક્રીભવનકારક સપાટી વચ્ચે પારદર્શક માધ્યમ ધરાવતી રચનાને લેન્સ કહે છે. જેમાંની ઓછામાં ઓછી એક ગોળીય સપાટી છે. એક વક્રીભવનકારક ગોળીય સપાટી વડે રચાતા પ્રતિબિંબનું સૂત્ર મેળવી, તેનો લેન્સની બંને સપાટી પાસે વારાફરતી ઉપયોગ કરી લેન્સ મેકર્સનું સમીકરણ અને પછી લેન્સનું સૂત્ર મેળવીશું.

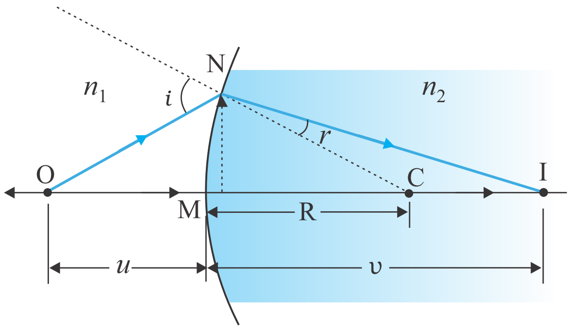
9.5.1 ગોળીય સપાટી પાસે થતું વક્રીભવન (Refraction at a Spherical Surface)

જે વક્રસપાટીનું વક્રતાકેન્દ્ર C અને વક્રતાત્રિજ્યા R છે, તેવી વક્રસપાટીના મુખ્ય અક્ષ પર મુકેલી વસ્તુ Oનું પ્રતિબિંબ I રચાવાની ભૂમિતિ આકૃતિ 9.17માં દર્શાવેલ છે. n_1 વક્રીભવનાંક ધરાવતા માધ્યમમાંથી કિરણો આપાત થાય છે અને n_2 વક્રીભવનાંક ધરાવતા બીજા માધ્યમમાં વક્રીભવન પામે છે. અગાઉની જેમ સંલગ્ન અંતરોની સરખામણીમાં વક્રસપાટીનું મુખ (Aperture) નાનું ધારીશું (અથવા રેખીય પરિમાણ નાનું લઈશું) જેથી ખૂણાઓને નાના ધારી શકાશે. અને ખાસ તો NMને બિંદુ Nમાંથી મુખ્ય અક્ષ પર દોરેલા લંબ જેટલી લંબાઈનું લઈ શકાશે. હવે, નાના ખૂણાઓ માટે;

$$\tan \angle NOM = \frac{MN}{OM}$$

$$\tan \angle NCM = \frac{MN}{MC}$$

$$\tan \angle NIM = \frac{MN}{MI}$$



આકૃતિ 9.17 બે પારદર્શક માધ્યમોને અલગ કરનાર કોઈ ગોળીય આંતરપૃષ્ઠ આગળ થતું વક્રીભવન

હવે, ΔNOC માટે, i બહિષ્કોણ છે. માટે,

$$i = \angle NOM + \angle NCM$$

પ્રકાશના સ્રોત અને પ્રકાશમાપન

એ જાણીતું છે કે કોઈ પણ પદાર્થ નિરપેક્ષ શૂન્ય કરતાં ઊંચા તાપમાને પોતાનામાંથી વિદ્યુત-ચુંબકીય વિકિરણનું ઉત્સર્જન કરે છે. ઉત્સર્જિત વિકિરણની તરંગલંબાઈ (λ) (અથવા આવૃત્તિ ν)નો વિસ્તાર પદાર્થના નિરપેક્ષ તાપમાન પર આધાર રાખે છે. ગરમ પદાર્થમાંથી ઉત્સર્જિત વિકિરણો, દા.ત. ટંગસ્ટનના ફિલામેન્ટમાંથી 2850 K તાપમાને ઉત્સર્જિત થતા વિકિરણો, અંશતઃ અદૃશ્ય હોય છે અને મોટેભાગે તેઓ પારરક્ત (ગરમીના કિરણો - Heat Rays) વિસ્તારમાં હોય છે. પદાર્થનું તાપમાન વધતાં ઉત્સર્જિત થતા વિકિરણની તરંગલંબાઈ પણ વધે છે, જે દૃશ્ય વિસ્તારમાં હોય છે. આશરે 5500 K તાપમાને સૂર્ય જે વિકિરણોનું ઉત્સર્જન કરે છે તેના માટે ઊર્જા વિરુદ્ધ તરંગલંબાઈના આલેખમાં મહત્તમ મૂલ્ય (Peak) 550 nm તરંગલંબાઈને અનુરૂપ મળે છે, જે લીલા રંગનો પ્રકાશ છે અને તે દૃશ્ય વિસ્તારના લગભગ મધ્યમાં છે. આપેલ પદાર્થ માટે ઊર્જા વિરુદ્ધ તરંગલંબાઈ વહેંચણીનો આલેખ અમુક ચોક્કસ-તરંગલંબાઈ માટે મહત્તમ (Peak) મૂલ્ય આપે છે, આ તરંગલંબાઈ પદાર્થના નિરપેક્ષ તાપમાનના વ્યસ્તપ્રમાણમાં હોય છે.

મનુષ્યની આંખ જે પ્રકાશને જોઈ શકે છે તેના માપનને પ્રકાશમાન-*દીપ્તિમાપન* (*Photometry*) કહે છે. દીપ્તિમાપન એ શરીર વિજ્ઞાન અંગેની (Physiological) અસરનું માપન છે, જે પ્રકાશીય ઉત્તેજના છે જેમાં પ્રકાશ મનુષ્યની આંખ વડે પ્રાપ્ત થયા બાદ પ્રકાશીય ચેતાતંતુઓ દ્વારા પરિવહન પામે અને મગજ દ્વારા તેનું વિશ્લેષણ થાય છે. દીપ્તિમાપનની મુખ્ય ત્રણ ભૌતિક રાશિ છે. (i) સ્રોતની *જ્યોતિ તીવ્રતા* (*Luminous intensity* of source) (ii) *જ્યોતિ ફ્લક્સ* (*Luminous flux*) અથવા સ્રોતમાંથી પ્રકાશનો પ્રવાહ (iii) સપાટીનું *દીપ્તિમાન* (*Illuminance* of the surface). *જ્યોતિ તીવ્રતા*નો SI એકમ કેન્ડેલા (*cd*) છે. આપેલી દિશામાં 540×10^{12} Hz આવૃત્તિ ધરાવતાં એકરંગી વિકિરણની વિકિરણ તીવ્રતા 1/683 watt/*sr* જેટલી હોય તો તે દિશામાં જ્યોતિતીવ્રતા 1 *cd* કહેવાય. જો પ્રકાશનું ઉદ્‌ગમ 1 કેન્ડેલા જેટલી જ્યોતિતીવ્રતા ઉત્સર્જિત કરે અને 1 *sr* જેટલા ઘનકોણ પર આપાત થતી હોય તો આ ઘનકોણમાં ઉત્સર્જિત થતું કુલ જ્યોતિ ફ્લક્સ 1 *લ્યુમેન* (*lm*) કહેવાય. પ્રમાણિત 100 wattનો પ્રકાશનો બલ્બ જ્યારે પ્રકાશિત હોય ત્યારે આશરે 1700 લ્યુમેન જ્યોતિ ફ્લક્સ ઉત્સર્જિત કરે છે.

દીપ્તિમાપનમાં જો સીધુ માપન થઈ શકતી કોઈ રાશિ હોય તો તે સપાટીનું *દીપ્તિમાન* (*Illuminance*) છે. સપાટીના એકમ ક્ષેત્રફળ પર આપાત થતાં જ્યોતિ ફ્લક્સને તે સપાટીનું દીપ્તિમાન (lm/m^2 અથવા *lux*)કહે છે. મોટા ભાગના પ્રકાશમાપકો આ રાશિ માપે છે. જ્યોતિ તીવ્રતા I ધરાવતાં ઉદ્‌ગમ દ્વારા ઉદ્‌ભવતું દીપ્તિમાન E હોય તો, $E = I/r^2$ વડે દર્શાવી શકાય. જ્યાં r = ઉદ્‌ગમથી સપાટીનું લંબ અંતર. ઉત્સર્જક અથવા પરાવર્તક સપાટ સપાટીની પ્રકાશિતતા (Brightness) *જ્યોતિર્મયતા* (*લ્યૂમીનન્સ* - (*L*) નામની રાશિ વડે દર્શાવાય છે. તેનો એકમ cd/m^2 (ઔદ્યોગિક ક્ષેત્રમાં તેને "nit" કહે છે). એક સારા LCD કમ્પ્યુટર મોનીટરની પ્રકાશિતતા 250 nit જેટલી હોય છે.

$$\therefore i = \frac{MN}{OM} + \frac{MN}{MC} \qquad (9.13)$$

આ જ પ્રમાણે,

$r = \angle NCM - \angle NIM$

$$\therefore r = \frac{MN}{MC} - \frac{MN}{MI} \qquad (9.14)$$

હવે સ્નેલના નિયમ પ્રમાણે,

$n_1 \sin i = n_2 \sin r$

નાના ખૂણાઓ માટે,

$n_1 i = n_2 r$

સમીકરણ 9.13 અને 9.14માંથી કિંમતો મૂકતાં,

$$\frac{n_1}{\text{OM}} + \frac{n_2}{\text{MI}} = \frac{n_2 - n_1}{\text{MC}} \qquad (9.15)$$

અહીં OM, MI અને MC અંતરોનાં માન દર્શાવે છે. કાર્તેઝિય સંજ્ઞા પ્રણાલિ લાગુ પાડતાં,

$$\text{OM} = -u,\ \text{MI} = +\upsilon \text{ અને } \text{MC} = +\text{R}$$

$$\frac{n_1}{-u} + \frac{n_2}{\upsilon} = \frac{n_2 - n_1}{\text{R}} \quad \text{અથવા} \quad \frac{n_2}{\upsilon} - \frac{n_1}{u} = \frac{n_2 - n_1}{\text{R}} \qquad (9.16)$$

સમીકરણ 9.16 વસ્તુઅંતર અને પ્રતિબિંબ અંતર વચ્ચેનો સંબંધ માધ્યમના વક્રીભવનાંક અને વક્રસપાટીની વક્રતાત્રિજ્યાના પદમાં દર્શાવે છે.

આ સમીકરણ દરેક ગોળીય સપાટી માટે સાચું છે.

ઉદાહરણ 9.6 હવામાં રાખેલા એક બિંદુવત્ ઉદ્‌ગમમાંથી પ્રકાશ એક કાચની ગોળીય સપાટી ($n = 1.5$ અને વક્રતા ત્રિજ્યા = 20 cm) પર આપાત થાય છે. આ ગોળીય સપાટીથી પ્રકાશ ઉદ્‌ગમ 100 cm દૂર છે. પ્રતિબિંબ કયા સ્થાને રચાશે ?

ઉકેલ સમીકરણ 9.16માંના સંબંધનો ઉપયોગ કરીએ. અહીં,

$u = -100$ cm, $\upsilon = ?$, R $= +20$ cm, $n_1 = 1$, $n_2 = 1.5$

$$\frac{1.5}{\upsilon} + \frac{1}{100} = \frac{0.5}{20}$$

અથવા $\upsilon = +100$ cm

આમ, સપાટીથી આપાત કિરણની દિશામાં 100 cm દૂર પ્રતિબિંબ મળશે.

ઉદાહરણ 9.6

9.5.2 લેન્સ વડે વક્રીભવન (Refraction by a Lens)

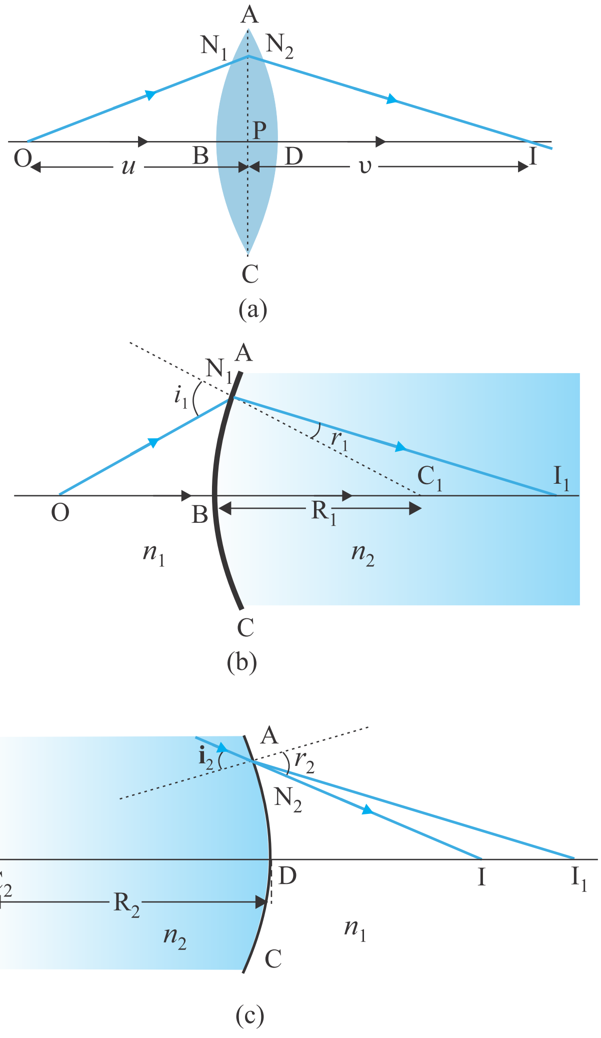
[આકૃતિ 9.18 (a)] બહિર્ગોળ લેન્સ વડે પ્રતિબિંબની રચનાની ભૂમિતિ દર્શાવે છે. પ્રતિબિંબની રચના બે તબક્કે થતી જોઈ શકાય. (i) પ્રથમ વક્રીકારક સપાટી વસ્તુ Oનું પ્રતિબિંબ I_1 આપે છે, [આકૃતિ 9.18(b)] આ પ્રતિબિંબ I_1 એ બીજી વક્રીકારક સપાટી માટે આભાસી વસ્તુ તરીકે વર્તે છે. [આકૃતિ 9.18(c)] પ્રથમ આંતરપૃષ્ઠ ABC પાસે સમીકરણ (9.15) પરથી,

$$\frac{n_1}{\text{OB}} + \frac{n_2}{\text{BI}_1} = \frac{n_2 - n_1}{\text{BC}_1} \qquad (9.17)$$

બીજા આંતરપૃષ્ઠ* ADC પાસે આવી જ પ્રક્રિયા કરતાં,

$$-\frac{n_2}{\text{DI}_1} + \frac{n_1}{\text{DI}} = \frac{n_2 - n_1}{\text{DC}_2} \qquad (9.18)$$

* **નોંધ :** હવે ADCની જમણી બાજુના માધ્યમનો વક્રીભવનાંક n_1 અને ડાબી બાજુનો વક્રીભવનાંક n_2 છે. વધુમાં, DI_1 ઋણ ગણાશે કારણકે આ અંતર આપાત કિરણની વિરુદ્ધ દિશામાં માપવામાં આવ્યું છે.



આકૃતિ 9.18 (a) બહિર્ગોળ લેન્સ વડે વસ્તુના રચાતા પ્રતિબિંબનું સ્થાન (b) પ્રથમ ગોળીય સપાટી પાસે વક્રીભવન (c) બીજી ગોળીય સપાટી પાસે વક્રીભવન

પાતળા લેન્સ માટે,

$BI_1 = DI_1$

સમીકરણ 9.17 અને 9.18નો સરવાળો કરતાં,

$$\frac{n_1}{OB} + \frac{n_1}{DI} = (n_2 - n_1)\left(\frac{1}{BC_1} + \frac{1}{DC_2}\right) \qquad (9.19)$$

ધારોકે વસ્તુ અનંત અંતરે છે.

એટલે કે, $OB \rightarrow \infty$ અને $DI = f$, સમીકરણ (9.19) પરથી,

$$\frac{n_1}{f} = (n_2 - n_1)\left(\frac{1}{BC_1} + \frac{1}{DC_2}\right) \qquad (9.20)$$

અનંત અંતરે રાખેલી વસ્તુનું પ્રતિબિંબ જ્યાં મળે છે તે બિંદુને લેન્સનું *મુખ્યકેન્દ્ર* F કહે છે અને અંતર f (= PF) તેની *કેન્દ્રલંબાઈ* દર્શાવે છે. લેન્સને બે મુખ્યકેન્દ્રો F અને F' તેની જુદી જુદી બાજુએ હોય છે. (આકૃતિ 9.19),

સંજ્ઞા પદ્ધતિ પ્રમાણે,

$BC_1 = +R_1$

$DC_2 = -R_2$

સમીકરણ 9.20 પરથી,

$$\frac{1}{f} = (n_{21} - 1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)\left(\because n_{21} = \frac{n_2}{n_1}\right) \qquad (9.21)$$

સમીકરણ 9.21ને *લેન્સમેકરનું* સમીકરણ કહે છે. આ સૂત્રની મદદથી યોગ્ય વક્રતાત્રિજ્યાની સપાટીઓનો ઉપયોગ કરી ઇચ્છિત કેન્દ્રલંબાઈના લેન્સ બનાવી શકાય છે. અત્રે નોંધનીય છે કે લેન્સમેકરનું આ સૂત્ર અંતર્ગોળ લેન્સ માટે પણ સાચું છે. અંતર્ગોળ લેન્સ માટે R_1 ઋણ છે અને R_2 ધન છે. આથી, f ઋણ મળે છે.

સમીકરણ (9.19) અને (9.20) પરથી,

$$\frac{n_1}{OB} + \frac{n_1}{DI} = \frac{n_1}{f} \qquad (9.22)$$

પાતળા લેન્સ માટે B અને D બંને, લેન્સના ઑપ્ટિકલ કેન્દ્રની ખુબ જ નજીક હોય છે, સંજ્ઞા પદ્ધતિ મુજબ

$BO = -u$ અને $DI = +\upsilon$ લેતાં,

$$\frac{1}{\upsilon} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f} \qquad (9.23)$$

સમીકરણ (9.23)એ *પાતળા લેન્સ* માટેનું જાણીતું સૂત્ર છે. આ સમીકરણ આપણે બહિર્ગોળ લેન્સ વડે રચાતા વાસ્તવિક પ્રતિબિંબ માટે મેળવ્યું હોવા છતાં અંતર્ગોળ અને બહિર્ગોળ બંને લેન્સ માટે તથા વાસ્તવિક અને આભાસી બંને પ્રતિબિંબ માટે સાચું છે.

એ નોંધપાત્ર છે કે દ્વિઅંતર્ગોળ અથવા દ્વિબહિર્ગોળ લેન્સ માટે મળતા બે મુખ્યકેન્દ્રો F અને F' બંને લેન્સના ઑપ્ટિકલ કેન્દ્રથી સમાન અંતરે હોય છે. મૂળ ઉદ્‌ગમ તરફના મુખ્યકેન્દ્રને *પ્રથમ મુખ્યકેન્દ્ર* અને બીજી તરફના મુખ્યકેન્દ્રને *દ્વિતીય મુખ્યકેન્દ્ર* કહે છે.

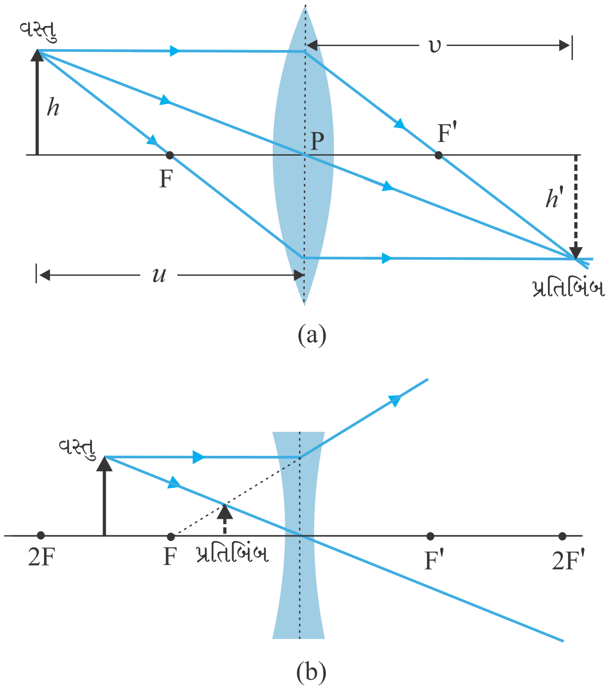
લેન્સ વડે રચાતું પ્રતિબિંબ મેળવવા માટે, સિદ્ધાંતમાં આપણે વસ્તુના કોઈ એક બિંદુમાંથી ઉત્સર્જિત થતાં કોઈ પણ બે કિરણો લઈ, વક્રીભવનના નિયમોની મદદથી તેમનો માર્ગ નક્કી કરીશું, અને આ બે વક્રીભૂત કિરણો જ્યાં મળે છે. (અથવા મળતાં હોય તેવો ભાસ થાય છે) તે બિંદુ શોધી કાઢીશું. જો કે, વ્યાવહારીક રીતે નીચેના પૈકી કોઈ પણ બે કિરણો પસંદ કરવાનું સુગમ છે :

(i) વસ્તુમાંથી ઉત્સર્જિત થઈ લેન્સની મુખ્ય અક્ષને સમાંતર કિરણ વક્રીભવન થયા બાદ દ્વિતીય મુખ્યકેન્દ્રમાંથી પસાર થાય (બહિર્ગોળ લેન્સમાં) અથવા પ્રથમ મુખ્ય કેન્દ્રમાંથી અપકેન્દ્રિત થાય (અંતર્ગોળ લેન્સમાં).

(ii) લેન્સના ઑપ્ટિકલ કેન્દ્રમાંથી પસાર થતું કિરણ, વક્રીભવન બાદ વિચલન પામ્યા વિના પસાર થાય છે.

(iii) બહિર્ગોળ લેન્સ માટે પ્રથમ મુખ્ય કેન્દ્રમાંથી પસાર થતું કિરણ અથવા (અંતર્ગોળ લેન્સ માટે બીજા મુખ્ય કેન્દ્રમાં જતું હોય તેમ દેખાતું કિરણ) વક્રીભવન બાદ મુખ્ય અક્ષને સમાંતર નિર્ગમ થાય છે.

આકૃતિ 9.19 (a) અને (b) અનુક્રમે બહિર્ગોળ લેન્સ અને અંતર્ગોળ લેન્સ માટે આ નિયમો દર્શાવે છે. તમારે લેન્સની આગળ જુદા જુદા સ્થાને રહેલી વસ્તુ માટે આવી કિરણાકૃતિઓ દોરવાનો મહાવરો કરવો જોઈએ અને લેન્સનું સૂત્ર (સમીકરણ 9.23) બધા કિસ્સાઓમાં લાગુ પડે છે તે પણ ચકાસવું જોઈએ.



આકૃતિ 9.19 (a) બહિર્ગોળ લેન્સ (b) અંતર્ગોળ લેન્સમાંથી પસાર થતા કિરણો

અત્રે ફરી એ બાબત યાદ રાખવી જોઈએ કે વસ્તુ પરનું દરેક બિંદુ અનંત કિરણો ઉત્સર્જિત કરે છે. આ બધા કિરણો લેન્સ આગળ વક્રીભવન બાદ પ્રતિબિંબના એક જ બિંદુમાંથી પસાર થાય છે.

અરીસાની જેમ લેન્સ વડે મળતા પ્રતિબિંબની ઊંચાઈ અને વસ્તુની ઊંચાઈના ગુણોત્તરને પ્રતિબિંબની મોટવણી (m) કહે છે. ગોળાકાર અરીસાની જેમ આગળ વધતાં લેન્સ માટે નીચેનું સૂત્ર મળે છે.

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{\upsilon}{u} \tag{9.24}$$

સંજ્ઞા પદ્ધતિ લાગુ પાડતાં જણાય છે કે, બહિર્ગોળ કે અંતર્ગોળ લેન્સ દ્વારા રચાતું પ્રતિબિંબ જો ચત્તું (અને આભાસી) હોય તો m ધન છે અને જો ઉલટું (અને વાસ્તવિક) હોય તો m ઋણ છે.

ઉદાહરણ 9.7 એક જાદુગર તેના પ્રોગ્રામમાં એક પ્રવાહીમાં રાખેલા કાચના લેન્સ (n = 1.47)ને અદૃશ્ય કરે છે. તો પ્રવાહીનો વક્રીભવનાંક કેટલો હશે ? શું આ પ્રવાહી પાણી હોઈ શકે ?

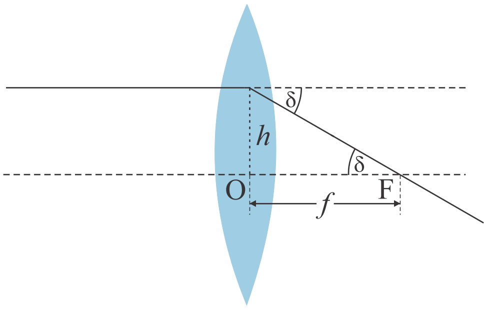
ઉકેલ

લેન્સ અદૃશ્ય થાય તે માટે જરૂરી છે કે પ્રવાહીનો વક્રીભવનાંક લેન્સના દ્રવ્યના વક્રીભવનાંક $n = 1.47$ જેટલો જ હોવો જોઈએ. એટલેકે $n_1 = n_2$. આ પરથી $1/f = 0$ અથવા $f \to \infty$ થશે. પ્રવાહીમાં લેન્સ કાચની સમતલ પ્લેટ તરીકે વર્તશે. ના, આ પ્રવાહી પાણી ન હોઈ શકે. તે ગ્લિસરીન હોઈ શકે.

ઉદાહરણ 9.7

9.5.3 લેન્સનો પાવર (Power of a Lens)

લેન્સની તેના ઉપર આપાત થતા પ્રકાશને કેન્દ્રિત કે વિકેન્દ્રિત કરવાની ક્ષમતાને (માપને) લેન્સનો પાવર કહે છે. સ્પષ્ટ છે કે જેમ લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ નાની તેમ બહિર્ગોળ લેન્સના કિસ્સામાં કેન્દ્રિત કરવામાં અને



આકૃતિ 9.20 લેન્સનો પાવર

અંતર્ગોળ લેન્સના કિસ્સામાં વિકેન્દ્રિત કરવાનાં લેન્સ કિરણોને વધારે વાંકા વાળે છે. લેન્સના ઑપ્ટિકલ કેન્દ્રથી એકમ અંતરે ($h = 1$) મુખ્ય અક્ષને સમાંતર લેન્સ પર આપાત થતું કિરણ જૂથ જેટલા કોણે કેન્દ્રિત અથવા વિકેન્દ્રિત થાય છે તેના ટેન્જેન્ટ (Tangent)ના મૂલ્યને લેન્સનો *પાવર* P કહે છે (આકૃતિ 9.20).

$\tan\delta = \frac{h}{f}$; જો $h = 1$ હોય તો, $\tan\delta = \frac{1}{f}$ અથવા δ ના નાના મૂલ્યો માટે, $\delta = \frac{1}{f}$

$$\text{આમ, } P = \frac{1}{f} \quad (9.25)$$

પાવરનો SI એકમ Dioptre (D) છે : $1D = 1\ m^{-1}$. 1 m કેન્દ્રલંબાઈના લેન્સનો પાવર 1 D છે. બહિર્ગોળ (અભિસારી) લેન્સ માટે પાવરનું મૂલ્ય ધન અને અંતર્ગોળ (અપસારી) લેન્સ માટે ઋણ હોય છે. જ્યારે આંખના ડૉક્ટર (Optician) +2.5 D પાવરના લેન્સનું પ્રિસ્ક્રિપ્શન (Prescription) આપે છે ત્યારે એનો અર્થ એમ થાય છે કે જરૂરી બહિર્ગોળ લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ +40 cm છે. જો લેન્સનો પાવર −4 D હોય તો જરૂરી અંતર્ગોળ લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ −25 cm છે.

ઉદાહરણ 9.8 (i) કાચના લેન્સ માટે $f = 0.5$ m હોય તો લેન્સનો પાવર કેટલો હશે ? (ii) દ્વિ-બહિર્ગોળ લેન્સની બંને બાજુઓની વક્રતાત્રિજ્યા અનુક્રમે 10 cm અને 15 cm છે. તેની કેન્દ્રલંબાઈ 12 cm હોય તો લેન્સના દ્રવ્ય (કાચનો) વક્રીભવનાંક કેટલો હશે ? (iii) એક બહિર્ગોળ લેન્સની હવામાં કેન્દ્રલંબાઈ 20 cm છે. તો પાણીમાં તેની કેન્દ્રલંબાઈ કેટલી હશે ? (હવા-પાણીનો વક્રીભવનાંક 1.33 છે, હવા-કાચ માટે વક્રીભવનાંક 1.5 છે.)

ઉકેલ

(i) પાવર = +2 ડાયોપ્ટર

(ii) અહીં, આપણી પાસે $f = +12$ cm, $R_1 = +10$ cm, $R_2 = -15$ cm છે. હવાનો વક્રીભવનાંક 1 લેવાય છે.

સમીકરણ (9.22) લેન્સ સૂત્રના ઉપયોગ કરતાં f, R_1 અને R_2 માટે સંજ્ઞા પદ્ધતિ લાગુ પાડી કિંમતો મૂકતાં,

$$\frac{1}{12} = (n-1)\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{-15}\right)$$

આ પરથી, $n = 1.5$ મળે છે.

(iii) હવાના માધ્યમમાં રહેલ કાચના લેન્સ માટે, $n_2 = 1.5$, $n_1 = 1$, $f = +20$ cm. તેથી લેન્સ ફોર્મ્યુલા મુજબ

$$\frac{1}{20} = 0.5\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right]$$

કાચનો આજ લેન્સ પાણીના માધ્યમમાં હોય ત્યારે, $n_2 = 1.5$, $n_1 = 1.33$ માટે

$$\frac{1.33}{f} = (1.5 - 1.33)\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right] \quad (9.26)$$

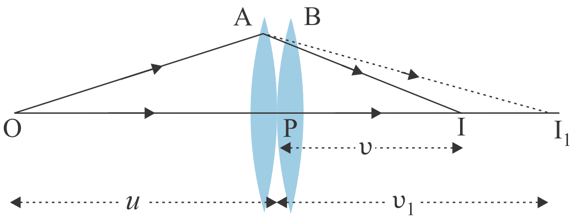
આ બે સમીકરણોને ઉકેલતાં $f = +78.2$ cm મળે છે.

ઉદાહરણ 9.8

9.5.4 સંપર્કમાં રહેલા પાતળા લેન્સનું સંયોજન (Combination of Thin Lenses in Contact)

f_1 અને f_2 કેન્દ્રલંબાઈના બે લેન્સ A અને Bને એકબીજાના સંપર્કમાં રાખ્યા છે. પ્રથમ લેન્સ Aના મુખ્યકેન્દ્રથી દૂર વસ્તુ Oને રાખી છે (આકૃતિ 9.21).

પ્રથમ લેન્સ I_1 સ્થાને પ્રતિબિંબ રચે છે. આ પ્રતિબિંબ વાસ્તવિક છે અને બીજા લેન્સ B માટે આભાસી વસ્તુ તરીકે વર્તે છે અને અંતિમ પ્રતિબિંબ I પાસે મળે છે. છતાં, બરાબર નોંધી લો કે પ્રથમ લેન્સના કારણે મળતા પ્રતિબિંબની ધારણા માત્ર અંતિમ પ્રતિબિંબ મેળવવા માટે જ કરવામાં આવે છે. હકીકતમાં પ્રથમ લેન્સમાંથી બહાર આવતાં કિરણો જ બીજા લેન્સ વડે તેના પર આપાત થયેલા કોણને અનુરૂપ યોગ્ય કોણે વક્રીભૂત થઈ અંતિમ પ્રતિબિંબ આપે છે. બંને લેન્સ પાતળા હોવાથી તેમના ઑપ્ટિકલ કેન્દ્રો એકબીજા પર સંપાત થાય છે. તેમ લઈશું ધારોકે આ કેન્દ્ર બિંદુ P વડે દર્શાવ્યું છે.



આકૃતિ 9.21 સંપર્કમાં રાખેલા બે પાતળા લેન્સના સંયોજન વડે રચાતું પ્રતિબિંબ

પ્રથમ લેન્સ A વડે રચાતા પ્રતિબિંબ માટે,

$$\frac{1}{\upsilon_1} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f_1} \qquad (9.27)$$

બીજા લેન્સ B વડે રચાતા પ્રતિબિંબ માટે,

$$\frac{1}{\upsilon} - \frac{1}{\upsilon_1} = \frac{1}{f_2} \qquad (9.28)$$

(9.27) અને (9.28)નો સરવાળો કરતાં

$$\frac{1}{\upsilon} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \qquad (9.29)$$

બે લેન્સના તંત્રને કેન્દ્રલંબાઈ f ધરાવતા એક સમતુલ્ય લેન્સ તરીકે લઈએ તો,

$$\frac{1}{\upsilon} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f} \quad \text{આથી}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \qquad (9.30)$$

આ સૂત્ર ગમે તેટલી સંખ્યાના સંપર્કમાં રહેલા લેન્સો માટે સાચું છે. $f_1, f_2, f_3, ...$ કેન્દ્રલંબાઈના પાતળા ઘણા લેન્સ સંપર્કમાં હોય તો, તેમના સંયોજનની અસરકારક કેન્દ્રલંબાઈ,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + ... \quad \text{પરથી મળે છે.} \qquad (9.31)$$

પાવરના પદમાં સમીકરણ (9.31)

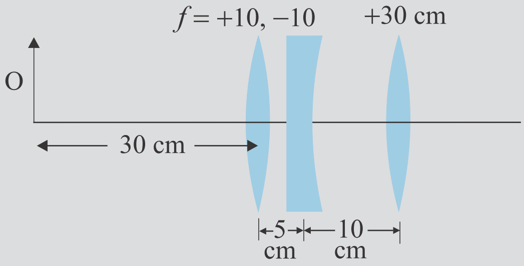
$$P = P_1 + P_2 + P_3 + ... \text{ તરીકે લખાય.} \qquad (9.32)$$

જ્યાં P એ લેન્સના સંયોજનનો પરિણામી પાવર છે. નોંધો કે સમીકરણ 9.32માં જે સરવાળો છે તે, દરેક પાવરનો બૈજીક સરવાળો દર્શાવે છે. આમ, જમણી બાજુના પદોમાં કેટલાક પદો ધન છે. (બહિર્ગોળ લેન્સ માટે) અને કેટલાક પદો ઋણ છે (અંતર્ગોળ લેન્સ માટે). લેન્સોનું યોગ્ય સંયોજન કરી ઇચ્છિત મોટવણીવાળા અભિસારી કે અપસારી લેન્સ મેળવી શકાય છે તેમજ પ્રતિબિંબની તીક્ષ્ણતા (Sharpness) પણ વધારી શકાય છે. પ્રથમ લેન્સના કારણે મળતું પ્રતિબિંબ બીજા લેન્સ માટે વસ્તુ તરીકે વર્તે છે; આથી સમીકરણ (9.25) પરથી કહી શકાય છે જો દરેક લેન્સની મોટવણી અનુક્રમે $m_1, m_2, m_3, ...$ હોય તો સંયોજનની કુલ મોટવણી તેમના ગુણાકાર જેટલી છે.

$$m = m_1 \, m_2 \, m_3 \, ... \qquad (9.33)$$

લેન્સોના સંયોજનનો ઉપયોગ કેમેરામાં, માઈક્રોસ્કોપમાં, ટેલિસ્કોપમાં તેમજ અન્ય પ્રકાશીય ઉપકરણોની રચનામાં થાય છે.

ઉદાહરણ 9.9 આકૃતિ 9.22માં દર્શાવેલા લેન્સના સંયોજન માટે પ્રતિબિંબ સ્થાન મેળવો.



આકૃતિ 9.22

ઉકેલ પ્રથમ લેન્સ દ્વારા મળતું પ્રતિબિંબ,

$$\frac{1}{\upsilon_1} - \frac{1}{u_1} = \frac{1}{f_1}$$

$$\frac{1}{\upsilon_1} - \frac{1}{-30} = \frac{1}{10}$$

અથવા $\upsilon_1 = 15\ \text{cm}$

પ્રથમ લેન્સ વડે રચાતું આ પ્રતિબિંબ બીજા લેન્સ માટે વસ્તુ તરીકે વર્તે છે અને તે બીજા લેન્સની જમણી બાજુએ (15 – 5) cm = 10 cm અંતરે છે. જોકે પ્રતિબિંબ વાસ્તવિક છે પરંતુ બીજા લેન્સ માટે તે આભાસી વસ્તુ તરીકે વર્તે છે. બીજા લેન્સ માટે કિરણો તેમાંથી આવતા જણાય છે. બીજા લેન્સ માટે,

$$\frac{1}{\upsilon_2} - \frac{1}{10} = \frac{1}{-10}$$

અથવા $\upsilon_2 = \infty$

બીજા લેન્સના કારણે આભાસી પ્રતિબિંબ અનંત અંતરે બીજા લેન્સની ડાબી તરફ મળે છે. આથી આ પ્રતિબિંબ ત્રીજા લેન્સ માટે વસ્તુ તરીકે વર્તે છે.

ત્રીજા લેન્સ માટે,

$$\frac{1}{\upsilon_3} - \frac{1}{u_3} = \frac{1}{f_3}$$

અથવા $\frac{1}{\upsilon_3} - \frac{1}{\infty} = \frac{1}{30}$

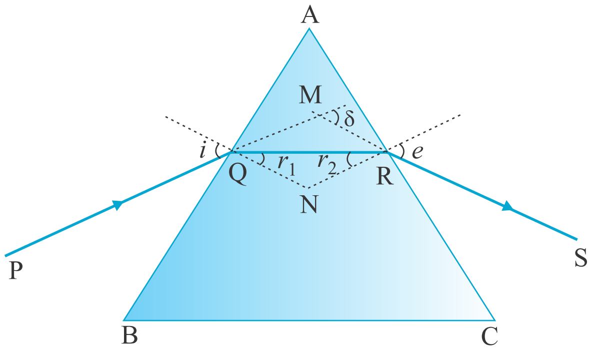
અથવા $\upsilon_3 = 30\ \text{cm}$

∴ અંતિમ પ્રતિબિંબ ત્રીજા લેન્સથી જમણી તરફ 30 cm દૂર મળશે.

ઉદાહરણ 9.9

9.6 પ્રિઝમ દ્વારા વક્રીભવન (Refraction Through a Prism)

આકૃતિ 9.23 ત્રિપાર્શ્વ કાચના પ્રિઝમ (ABC)માંથી પસાર થતાં એકરંગી પ્રકાશનો માર્ગ દર્શાવે છે. પ્રથમ બાજુ AB પાસે આપાતકોણ i અને વક્રીભૂતકોણ r_1 છે. બીજી બાજુ AC માટે (કાચમાંથી હવામાં) આપાતકોણ r_2 અને વક્રીભૂતકોણ અથવા નિર્ગમનકોણ e છે. નિર્ગમનકિરણ RS અને આપાત કિરણ PQની દિશા વચ્ચેના ખૂણાને *વિચલનકોણ* δ કહે છે.



આકૃતિ 9.23 કાચના ત્રિપાર્શ્વ (ત્રિકોણીય) પ્રિઝમમાંથી પસાર થતું પ્રકાશનું કિરણ

ચતુષ્કોણ AQNR માટે (શિરોબિંદુ Q અને R પાસેના) બે ખૂણાઓ 90° છે. આમ બાકીના બે ખૂણાઓનો સરવાળો 180° થશે.

$\angle A + \angle QNR = 180^\circ$

ΔQNR માટે,

$r_1 + r_2 + \angle QNR = 180^\circ$

આ બે સમીકરણોને સરખાવતાં

$$r_1 + r_2 = A \qquad (9.34)$$

મળે. બંને બાજુના વિચલનનો સરવાળો કુલ વિચલન δ દર્શાવે છે.

$\therefore\ \delta = (i - r_1) + (e - r_2)$

આથી,

$$\delta = i + e - A \qquad (9.35)$$

આમ વિચલનકોણ (δ) આપાતકોણ (i) પર આધાર રાખે છે.

વિચલનકોણ δ વિરુદ્ધ આપાતકોણનો આલેખ આકૃતિ 9.24માં દર્શાવેલો છે. આલેખ પરથી સમજી શકાય કે સામાન્યતઃ $i = e$ સિવાય, એક જ વિચલનકોણ (δ) માટે આપાતકોણ iના અને તેથી eના પણ બે મૂલ્યો મળે છે. હકીકતમાં આ બાબત, સમીકરણ (9.35)માં i અને eની સંમિતિ પરથી અપેક્ષિત છે. એટલે કે i અને eની અદલાબદલી કરતાં વિચલનકોણ (δ) સમાન મળે છે. ભૌતિક રીતે આ હકીકત આકૃતિ 9.23માં કિરણનો માર્ગ ઊલટો દોરવામાં આવે તો પણ વિચલનકોણ સમાન જ મળે છે તેની સાથે સંબંધિત છે. લઘુત્તમ વિચલન કોણ D_m માટે, પ્રિઝમમાં વક્રીભૂત કિરણ તેના પાયાને સમાંતર બને છે.

આમ, $\delta = D_m$ અને $i = e$ જે સુચવે છે કે, $r_1 = r_2$

સમીકરણ 9.34 પરથી

$$2r = A \text{ અથવા } r = \frac{A}{2} \qquad (9.36)$$

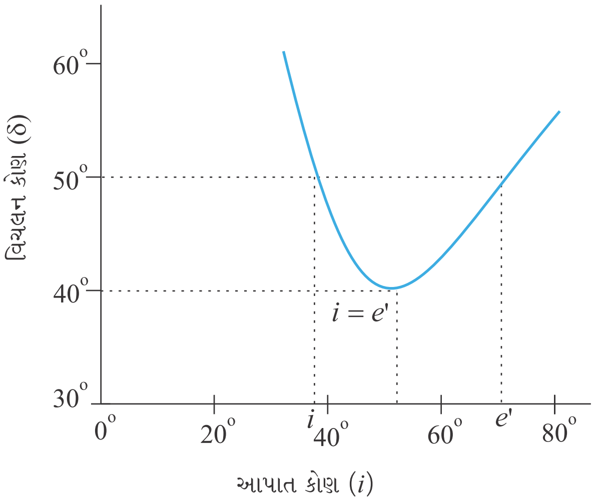
આજ રીતે સમીકરણ (9.35) પરથી,

$$D_m = 2i - A, \text{ અથવા } i = (A + D_m)/2 \qquad (9.37)$$

પ્રિઝમના દ્રવ્યનો વક્રીભવનાંક,

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin[(A + D_m)/2]}{\sin[A/2]} \qquad (9.38)$$

પ્રાયોગિક રીતે ખૂણો A અને D_m માપી શકાય છે. પ્રિઝમનાં દ્રવ્યનાં વક્રીભવનાંક નક્કી કરવાની રીત સમીકરણ (9.38) પૂરી પાડે છે.



આકૃતિ 9.24 ત્રિપાર્શ્વ પ્રિઝમ માટે વિચલનકોણ (δ) વિરુદ્ધ આપાતકોણ (i)નો આલેખ

નાના પ્રિઝમ કોણ A માટે D_m પણ નાનો હોય, અને આમ

$$n_{21} = \frac{\sin[(A + D_m)/2]}{\sin[A/2]} \approx \frac{(A + D_m)/2}{A/2}$$

$$D_m = (n_{21} - 1)A$$

આમ પાતળા પ્રિઝમ પ્રકાશનું વધારે વિચલન કરતાં નથી.

9.7 સૂર્યપ્રકાશને કારણે કેટલીક કુદરતી ઘટનાઓ (Some Natural Phenomena Due To Sunlight)

આપણી આસપાસની વસ્તુઓ સાથે સૂર્યપ્રકાશની આંતરક્રિયાને કારણે ઘણી સુંદર ઘટનાઓનું નિર્માણ થાય છે. આપણી આસપાસ કાયમ રંગોની જે વિવિધ ભવ્યતા માણીએ છીએ તે સૂર્યપ્રકાશના કારણે શક્ય બન્યું છે.

પ્રિઝમ દ્વારા દૃશ્ય (અથવા સફેદ) પ્રકાશના વિભાજન (ધોરણ X) અને વિદ્યુત ચુંબકીય વર્ણપટ (પ્રકરણ 8, ધોરણ XII)ના અભ્યાસ દરમિયાન આપણે જાણ્યું કે, પ્રત્યેક રંગ તરંગલંબાઈ સાથે સંકળાયેલ છે. દૃશ્ય પ્રકાશના વર્ણપટમાં, સૌથી મોટી તરંગલંબાઈ તરફના છેડા પાસે લાલ રંગ (~ 700 nm) અને સૌથી નાની તરંગલંબાઈ તરફના છેડા પાસે જાંબલી રંગ (~ 400 nm) હોય છે. જુદા જુદા રંગો માટે માધ્યમનો વક્રીભવનાંક જુદો જુદો હોવાથી રંગોનું વિભાજન થાય છે. ઉદાહરણ તરીકે કાચના પ્રિઝમમાં સફેદ પ્રકાશનાં લાલ ઘટકનું વિચલન સૌથી ઓછું થાય છે; જ્યારે જાંબલી ઘટકનું વિચલન સૌથી વધારે થાય છે આને સમતુલ્ય રીતે કહીએ તો કાચના પ્રિઝમમાં લાલ પ્રકાશ જાંબલી પ્રકાશ કરતાં ઝડપથી મુસાફરી કરે છે. ક્રાઉન કાચ અને ફ્લિન્ટ કાચ (Flint Glass) માટે વિવિધ રંગોના વક્રીભવનાંક કોષ્ટક 9.2માં દર્શાવ્યા છે. જાડા લેન્સ, ઘણા પ્રિઝમોના બનેલા ધારી શકાય, તેથી જાડા લેન્સ પ્રકાશના વિભાજનને કારણે *વર્ણ-વિપથન* (*Chromatic Aberration*) દર્શાવે છે. જ્યારે સફેદ પ્રકાશ જાડા લેન્સમાંથી પસાર થાય ત્યારે, લાલ અને વાદળી રંગો જુદા-જુદા બિંદુઓએ કેન્દ્રિત થાય છે. આ ઘટના *વર્ણ વિપથનની ક્ષતિ* તરીકે ઓળખાય છે.

કોષ્ટક 9.2 જુદી જુદી તરંગલંબાઈ માટે વક્રીભવનાંક

રંગ	તરંગલંબાઈ (nm)	ક્રાઉન કાચ	ફ્લિન્ટ કાચ
જાંબલી	396.9	1.533	1.663
વાદળી	486.1	1.523	1.639
પીળો	589.3	1.517	1.627
રાતો	656.3	1.515	1.622

તરંગલંબાઈ સાથે વક્રીભવનાંકમાં થતો ફેરફાર કેટલાક માધ્યમમાં બીજા કરતાં વધુ પ્રમાણમાં હોય છે. શૂન્યાવકાશમાં જો કે પ્રકાશનો વેગ તેની તરંગલંબાઈથી સ્વતંત્ર છે. આમ, શૂન્યાવકાશ એ અ-વિભાજક (અ-વિક્ષેપી) (Non-Dispersive) માધ્યમ છે. જેમાં બધા રંગો સમાન ઝડપથી ગતિ કરે છે. સૂર્યપ્રકાશ આપણા સુધી સફેદ પ્રકાશ સ્વરૂપે જ આવે છે. નહીં કે ઘટક રંગોના સ્વરૂપમાં, આ ઘટના પરથી પણ આ હકીકત સમજી શકાય છે. જ્યારે બીજી તરફ કાચ એ વિભાજક (વિક્ષેપી) (Dispersive) માધ્યમ છે.

આકાશનો વાદળી રંગ, વાદળોનો સફેદ રંગ, સૂર્યોદય તેમજ સૂર્યાસ્ત સમયે સૂર્યનો રતાશ પડતો રંગ, મેઘધનુષ, કેટલાક મોતીઓના તથા કેટલાક પક્ષીઓની પાંખોના અદ્ભૂત રંગોથી આપણે પરિચિત છીએ. આ પૈકીની કેટલીક ઘટનાઓની આપણે ભૌતિકવિજ્ઞાનની દૃષ્ટિએ ચર્ચા કરીશું.

9.7.1 મેઘધનુષ (The Rainbow)

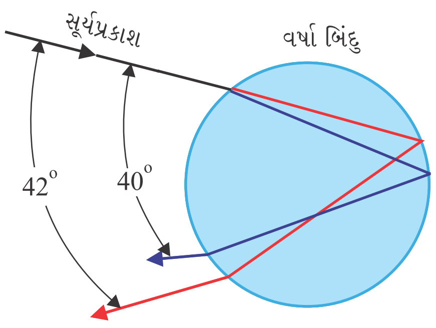
મેઘધનુષ એ સૂર્યપ્રકાશનું વાતાવરણમાંના પાણીના બુંદો દ્વારા થતાં વિભાજનનું એક ઉદાહરણ છે. વરસાદના ગોળાકાર બુંદને કારણે સૂર્યપ્રકાશનું વિભાજન, પરાવર્તન અને વક્રીભવન જેવી ઘટનાઓની સંયુક્ત અસરના કારણે આ ઘટના બને છે. મેઘધનુષ જોઈ શકાય તે માટેની શરત એ છે કે સૂર્ય આકાશમાં માત્ર એક તરફથી (ધારોકે પશ્ચિમ તરફના ક્ષિતિજ તરફથી) પ્રકાશિત હોવો જોઈએ અને બીજી તરફ (પૂર્વ તરફના ક્ષિતિજ બાજુ) વરસાદ પડતો હોવો જોઈએ અને જોનાર વ્યક્તિની પીઠ સૂર્ય તરફ હોય ત્યારે જ મેઘધનુષ જોઈ શકાય છે.

મેઘધનુષના નિર્માણને સમજવા માટે આકૃતિ [9.25(a)] ધ્યાનમાં લો. સૂર્યપ્રકાશ જ્યારે વરસાદના બુંદમાં પ્રવેશે છે ત્યારે પ્રથમ તેનું વક્રીભવન થાય છે અને આ સફેદ કિરણનું જુદી જુદી તરંગલંબાઈ (રંગમાં)માં વિભાજન થાય છે. વધુ તરંગલંબાઈ ધરાવતાં પ્રકાશનું (લાલ રંગનું) વક્રીભવન સૌથી ઓછું થાય છે જ્યારે ઓછી તરંગલંબાઈ ધરાવતા પ્રકાશનું (જાંબલી રંગ) વક્રીભવન સૌથી વધારે થાય છે. આ ઘટક કિરણો બુંદમાં તેની અંદરની સપાટી પર આપાત થાય છે, હવે જો આ વક્રીભૂત કિરણ અને બુંદની સપાટીને દોરેલા લંબ વચ્ચેનો ખૂણો ક્રાંતિકોણ (આ કિસ્સામાં 48°) કરતાં વધારે હોય તો, આપાત કિરણનું બુંદની અંદર પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય છે. આ પરાવર્તિત કિરણ બુંદની સપાટી પાસેથી પુનઃ વક્રીભવન થઈ બુંદમાંથી આકૃતિમાં દર્શાવ્યા પ્રમાણે બહાર આવે છે. એવું માલુમ પડ્યું કે, આપાતકિરણની સાથે 40° કોણે જાંબલી રંગનું કિરણ નિર્ગમન પામે છે. જ્યારે 42°ના કોણે લાલ રંગનું કિરણ નિર્ગમ પામે છે. બાકીના રંગો માટે નિર્ગમનકોણનાં મૂલ્યો આ બે ખૂણાઓની વચ્ચે મળે છે.

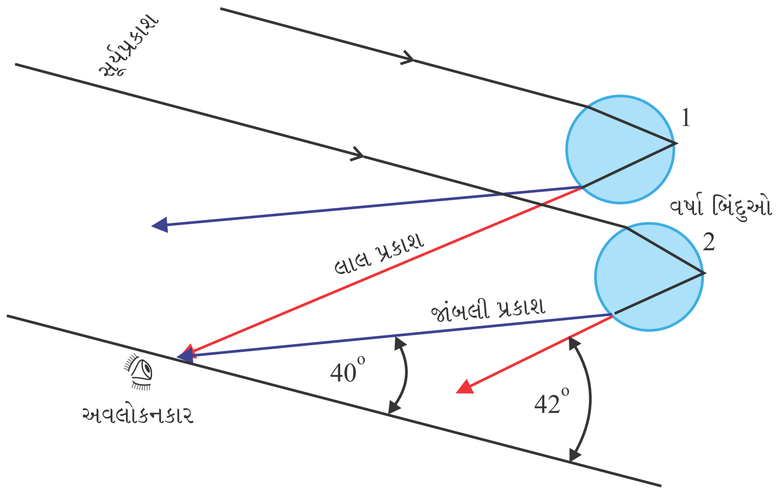
આકૃતિ 9.25 (b) પ્રાથમિક મેઘધનુષનું નિર્માણ સમજાવે છે. આપણે જોઈએ છીએ કે પાણીના બુંદ-1માંથી નિર્ગમન પામતું લાલરંગનું પ્રકાશનું કિરણ અને બુંદ-2માંથી નિર્ગમન પામતું જાંબલી રંગનું પ્રકાશનું કિરણ અવલોકન કર્તાની આંખ સુધી પહોંચે છે. જ્યારે બુંદ-1માંથી નિર્ગમન પામતાં જાંબલી કિરણની દિશા અને બુંદ-2 માંથી નિર્ગમન પામતા લાલ કિરણની દિશા અવલોકનકર્તાની આંખની ઉપર અથવા નીચે હોય છે આમ, અવલોકનકર્તાને લાલ રંગ સૌથી ઉપર અને જાંબલી રંગ સૌથી નીચે હોય તે રીતે મેઘધનુષ દેખાય છે. આમ, પ્રાથમિક મેઘધનુષ ત્રણ તબક્કામાં થતી પ્રક્રિયા એટલેકે વક્રીભવન, પરાવર્તન અને વક્રીભવનથી રચાય છે.

Formation of rainbows
http://www.eo.ucar.edu/rainbows
http://www.atoptics.co.uk/bows.htm

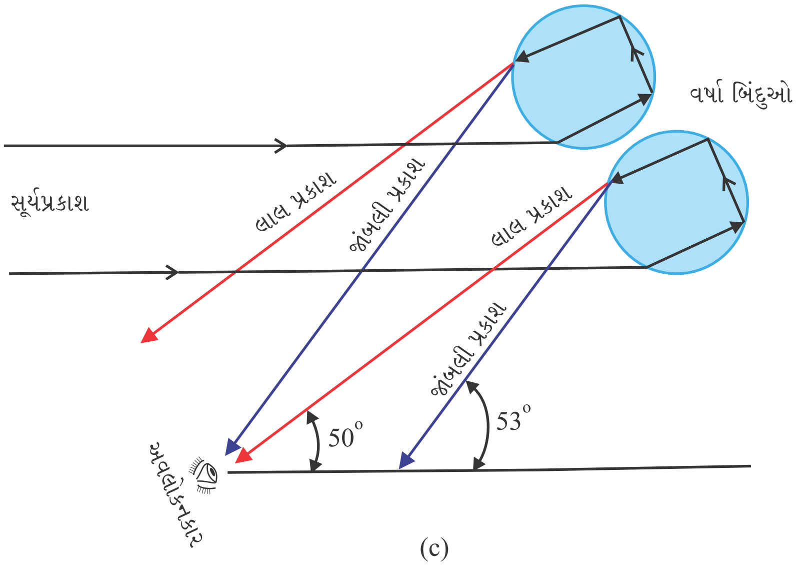
PHYSICS



(a)



(b)



(c)

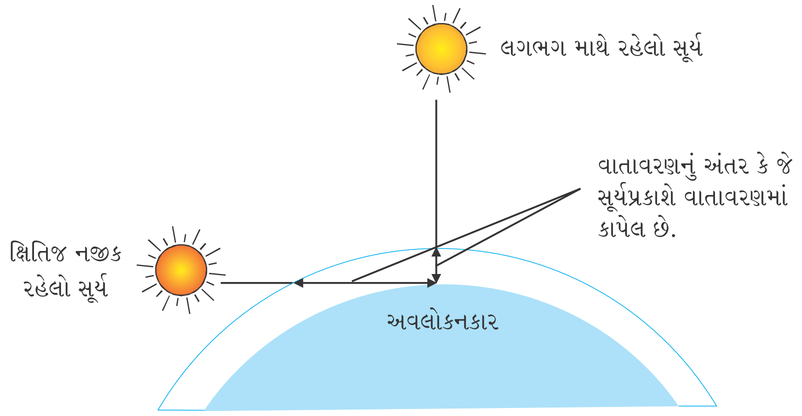
આકૃતિ 9.25 મેઘધનુષ (a) પાણીના બુંદ પર આપાત સૂર્યનાં કિરણનું બુંદ વડે બે વાર વક્રીભવન અને એકવાર પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય છે. (b) પ્રાથમિક મેઘધનુષમાં પાણીનાં બુંદમાં પ્રકાશનાં કિરણનું પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન અને વક્રીભવનની વિવર્ધિત આકૃતિ (c) પાણીના બુંદમાં બે વખત થતાં પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનથી ગૌણ મેઘધનુષ રચાય છે.

વરસાદનાં બુંદમાં જ્યારે પ્રકાશના કિરણનું મુખ્ય મેઘધનુષમાં જેમ 1 વાર પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય છે તેને બદલે 2 વાર પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય ત્યારે ગૌણ મેઘધનુષ રચાય છે, [આકૃતિ 9.25(c)]. ગૌણ મેઘધનુષ ચાર તબક્કામાં થતી વક્રીભવન, પરાવર્તન, પરાવર્તન અને વક્રીભવનની પ્રક્રિયાથી રચાય છે. બીજી વારના પરાવર્તનની ઘટનાના કારણે પ્રકાશની તીવ્રતા ઘણી ઘટી જાય છે. આથી ગૌણ મેઘધનુષ પ્રાથમિક મેઘધનુષ કરતાં ઝાંખુ દેખાય છે. વધુમાં ગૌણ મેઘધનુષમાં જોવા મળતા રંગોનો ક્રમ પણ પ્રાથમિક મેઘધનુષના રંગો કરતાં ઊલટો હોય છે, જે આકૃતિ 9.25(c)] પરથી સ્પષ્ટ છે.

9.7.2 પ્રકાશનું પ્રકીર્ણન (Scattering of Light)

સૂર્યપ્રકાશનું કિરણ જ્યારે પૃથ્વીના વાતાવરણમાંથી પસાર થાય છે ત્યારે વાતાવરણના સૂક્ષ્મકણો દ્વારા તેનું *પ્રકીર્ણન* (Scattering) (એની દિશા બદલે છે) થાય છે. ટૂંકી તરંગલંબાઈના પ્રકાશનું પ્રકીર્ણન લાંબી તરંગલંબાઈના પ્રકાશ કરતાં ઘણું વધારે થાય છે. (પ્રકીર્ણનની માત્રા તરંગલંબાઈના ચતુર્થઘાતના વ્યસ્ત પ્રમાણમાં હોય છે આને રેલે પ્રકીર્ણન કહે છે.) ભૂરા રંગની તરંગલંબાઈ લાલ રંગની તરંગલંબાઈ કરતાં ઘણી ઓછી હોય છે આથી ભૂરા રંગનું પ્રકિર્ણન ખૂબ જ વધારે પ્રમાણમાં થાય છે, આથી સ્વચ્છ આકાશમાં ભૂરો રંગ છવાઈ જાય છે. હકીકતમાં જાંબલી રંગની તરંગલંબાઈ ભૂરા રંગની તરંગલંબાઈ કરતાં ઓછી હોવાથી જાંબલી રંગનું પ્રકીર્ણન ભૂરા રંગના પ્રકીર્ણન કરતાં પણ વધારે થતું હોય છે. પરંતુ આપણી આંખ જાંબલી રંગ કરતાં ભૂરા રંગ માટે વધારે સંવેદી હોવાથી આપણને આકાશ ભૂરા રંગનું દેખાય છે.

વાતાવરણમાં રહેલા ધૂળના રજકણો અને પાણીના બુંદો જેવા મોટા કણો દ્વારા થતાં પ્રકીર્ણન અલગ હોય છે. અહીં સંબંધ ધરાવતી રાશિ પ્રકાશની તરંગલંબાઈ λ અને પ્રકીર્ણન કરતાં કણનું સાપેક્ષ પરિમાણ છે. જો કણોના લાક્ષણિક પરિમાણને a કહીએ તો, $a << \lambda$ હોય ત્યારે રેલે પ્રકીર્ણન જોવા મળે છે. જ્યાં પ્રકીર્ણનની માત્રા $1/\lambda^4$ના સમપ્રમાણમાં હોય છે. જો $a >> \lambda$ હોય અર્થાત્ મોટા કણો (દા.ત. વરસાદનાં ટીંપા, ધૂળની મોટી રજકણો, બરફની કણો વિગેરે) માટે આ સત્ય નથી, પ્રકીર્ણનની માત્રા બધી λ માટે લગભગ સમાન છે. આથી વાદળો કે જેમાં $a >> \lambda$ ધરાવતાં પાણી બુંદો હોય છે, તેઓ સામાન્ય રીતે સફેદ દેખાય છે.



આકૃતિ 9.26 સૂર્યોદય કે સૂર્યાસ્ત સમયે સૂર્યપ્રકાશ વાતાવરણમાં વધારે અંતર કાપે છે.

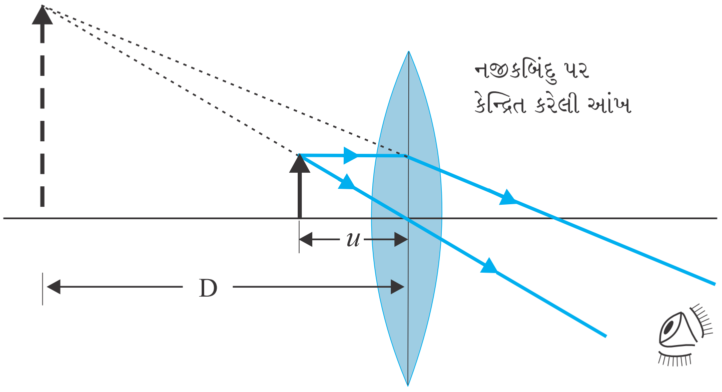
આકૃતિ 9.26માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે, સૂર્યોદય કે સૂર્યાસ્ત સમયે સૂર્યપ્રકાશે વાતાવરણમાં વધારે અંતર કાપવું પડે છે. આ દરમ્યાન ભૂરા રંગ ઉપરાંત ટૂંકી તરંગલંબાઈના અન્ય રંગોનું પણ પ્રકીર્ણન થઈ દૂર થઈ ગયા હોય છે. આથી આપણી આંખમાં ઓછું પ્રકીર્ણન પામેલ પ્રકાશ પ્રવેશે છે. આથી સૂર્ય રતાશ (Reddish or Orange-Red) પડતા રંગનો દેખાય છે. આ જ કારણોસર સૂર્ય અને પૂનમનો ચંદ્ર પણ ક્ષિતિજ પાસે રતાશ (Reddish) પડતા રંગનો દેખાય છે.

9.8 પ્રકાશીય ઉપકરણો (Optical Instruments)

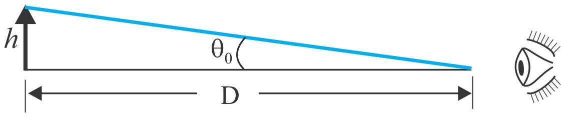
અરીસા, લેન્સ અને પ્રિઝમના પરાવર્તન અને વક્રીભવનના ગુણધર્મોનો ઉપયોગ કરી ઘણા પ્રકાશીય ઉપકરણો બનાવવામાં આવ્યા છે. પેરિસ્કૉપ (Periscope), કેલિડૉસ્કૉપ (Kaleidoscope), બાઈનોક્યુલર્સ (Binoculars), દૂરબીન (Telescope) સૂક્ષ્મદર્શક (Microscope) વિગેરે પ્રકાશીય ઉપકરણો વ્યવહારમાં ખૂબ જ સામાન્ય છે. માનવ આંખ એ કુદરતે આપણને આપેલ સર્વોત્તમ પ્રકાશીય ઉપકરણ છે એમ ચોક્કસ કહી શકાય. માનવ આંખ વિષે આપણે ધોરણ Xમાં અભ્યાસ કરી ગયા છીએ. હવે આપણે માઈક્રોસ્કોપ અને ટેલિસ્કોપના સિદ્ધાંત અને કાર્યપદ્ધતિ સમજીશું.

9.8.1 માઈક્રોસ્કોપ (Microscope)

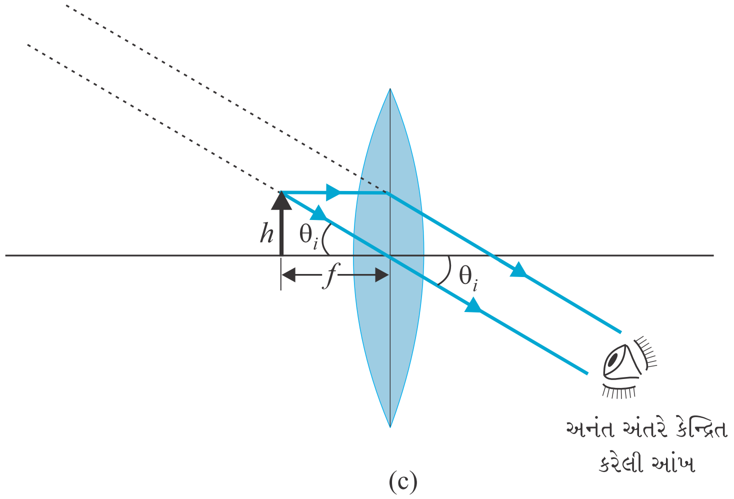
સાદું વિવર્ધક અથવા માઈક્રોસ્કોપ એ નાની કેન્દ્રલંબાઈ ધરાવતો અભિસારી (બહિર્ગોળ) લેન્સ છે (આકૃતિ 9.27). આવા લેન્સનો માઈક્રોસ્કોપ તરીકે ઉપયોગ કરવા માટે, લેન્સને વસ્તુની નજીક, એક કેન્દ્રલંબાઈ અથવા તેનાં કરતાં ઓછા અંતરે રાખવામાં આવે છે



(a)



(b)



(c)

આકૃતિ 9.27 સાદું માઈક્રોસ્કોપ (a) વિવર્ધક લેન્સને એવા સ્થાન પાસે રાખ્યો છે કે પ્રતિબિંબ નજીકબિંદુ પાસે રચાય. (b) વસ્તુ વડે આંતરાતો ખૂણો, નજીકબિંદુ અંતર પાસેના ખૂણા જેટલો જ હોય છે. (c) લેન્સના મુખ્ય કેન્દ્ર નજીક રાખેલ વસ્તુનું પ્રતિબિંબ ખૂબ જ દૂરના અંતરે, પરંતુ અનંત અંતર કરતાં નજીક મળે છે.

અને લેન્સની બીજી બાજુ લેન્સથી નજીક આંખને રાખવામાં આવે છે. અહીં યોજના એવી હોય છે કે વસ્તુનું, સીધું (ચત્તું) આભાસી અને વિવર્ધિત પ્રતિબિંબ એવા અંતરે મળે કે તેને સુગમતાથી જોઈ શકાય, અર્થાત્ 25 cm અથવા વધુ અંતરે મળે. જો વસ્તુ f જેટલા અંતરે હોય તો તેનું પ્રતિબિંબ અનંત અંતરે મળે છે. તેમ છતાં જો વસ્તુ લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈથી સહેજ જ ઓછા અંતરે હોય તો પ્રતિબિંબ આભાસી, ચત્તુ, વિવર્ધિત અને અનંત અંતર કરતાં નજીક મળે છે. પ્રતિબિંબને સરળતાથી આરામદાયક રીતે સ્પષ્ટ જોઈ શકાય તે માટે પ્રતિબિંબ નજીક બિંદુ અંતરે ($D \cong 25$ cm) હોવા છતાં, તે આંખને થોડો શ્રમ પહોંચાડે છે. આથી ઘણીવાર અનંત અંતરે રચાતા પ્રતિબિંબને આંખ વડે આરામદાયક રીતે જોવા માટે સૌથી યોગ્ય ગણવામાં આવે છે. આ બંને કિસ્સાઓ આપણે આકૃતિ 9.27માં જોઈ શકીએ છીએ. પ્રથમ કિસ્સો આકૃતિ (a)માં અને બીજો કિસ્સો આકૃતિ (b) અને (c)માં દર્શાવ્યો છે.

સાદા માઈક્રોસ્કોપ વડે નજીક બિંદુ D પાસે રચાતા પ્રતિબિંબની રેખીય મોટવણી m નીચેના સૂત્ર વડે આપવામાં આવે છે.

$$m = \frac{\upsilon}{u} = \upsilon\left(\frac{1}{\upsilon} - \frac{1}{f}\right) = \left(1 - \frac{\upsilon}{f}\right)$$

હવે, આપણી સંજ્ઞા પદ્ધતિ મુજબ υ ઋણ છે અને તે માનાંકમાં D જેટલું છે. આમ મોટવણી

$$m = \left(1 + \frac{D}{f}\right) \tag{9.39}$$

પરથી મળે છે. D = 25 cm છે, આથી મોટવણી 6 મેળવવા માટે લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ f = 5 cm રાખવી પડે.

નોંધો કે $m = h'/h$ જ્યાં h = વસ્તુની ઊંચાઈ અને h' = પ્રતિબિંબની ઊંચાઈ. આરામદાયક રીતે જોવા D અંતરે રાખેલ વસ્તુના પ્રતિબિંબે બનાવેલ ખૂણા અને વસ્તુએ બનાવેલ ખૂણાનો ગુણોત્તર પણ આ મોટવણી જેટલો છે. (નોંધો કે આ ખૂણો એ ખરેખર વસ્તુએ આંખ સાથે બનાવેલ ખૂણો જે h/u જેટલો હોય છે તે નથી) એક લેન્સવાળા સાદા વિવર્ધક (મેગ્નીફાયર) એટલું જ કરે છે કે તે વસ્તુને આંખથી D કરતાં નજીક લાવે છે.

હવે, આપણે પ્રતિબિંબ અનંત અંતરે હોય ત્યારે મોટવણી મેળવીશું. આ કિસ્સામાં આપણે *કોણીય* મોટવણી મેળવવી પડશે. ધારોકે વસ્તુની ઊંચાઈ h છે. જ્યારે વસ્તુ નજીક બિંદુ પર હોય અર્થાત્ D અંતરે હોય છે ત્યારે તે મહત્તમ કોણ બનાવે અને (લેન્સ વગર) તેને સ્પષ્ટ જોઈ શકાય છે. રચાતો ખૂણો નીચેના સૂત્ર વડે આપી શકાય છે.

$$\tan\theta_0 = \left(\frac{h}{D}\right) = \theta_0 \tag{9.40}$$

હવે આપણે વસ્તુ જ્યારે u અંતરે હોય ત્યારે, પ્રતિબિંબે આંખ સાથે બનાવેલો ખૂણો શોધીશું.

$$\frac{h'}{h} = m = \frac{\upsilon}{u}$$

સૂત્ર પરથી પ્રતિબિંબે બનાવેલ ખૂણો,

$\tan\theta_i = \dfrac{h'}{-\upsilon} = \dfrac{h}{-\upsilon}\cdot\dfrac{\upsilon}{u} = \dfrac{h}{-u} \approx \theta_i$ વસ્તુ જ્યારે $u = -f$ અંતરે હોય ત્યારે તેણે બનાવેલ ખૂણો,

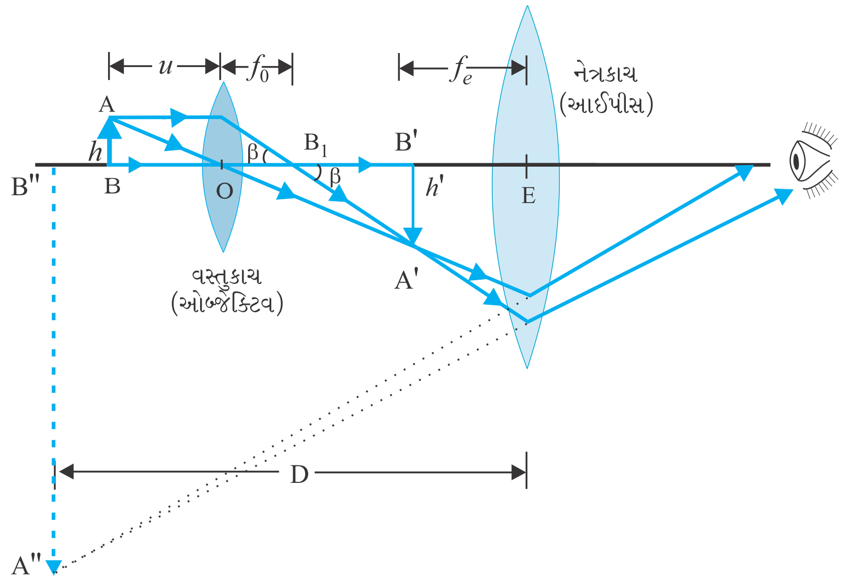
$$\theta_i = \left(\frac{h}{f}\right) \tag{9.41}$$

જે આકૃતિ 9.27(c)પરથી સ્પષ્ટ છે. આથી, કોણીય મોટવણી

$$m = \left(\frac{\theta_i}{\theta_0}\right) = \frac{D}{f} \tag{9.42}$$

જ્યારે પ્રતિબિંબ નજીક બિંદુ અંતર પાસે હોય (સમીકરણ 9.39) ત્યારે મળતી મોટવણી કરતાં આ એક જેટલું ઓછું છે પરંતુ પ્રતિબિંબ ખૂબ જ આરામદાયક રીતે જોઈ શકાય છે અને મોટવણીમાં મળતો તફાવત સામાન્ય રીતે ઘણો નાનો હોય છે. હવે પછીની પ્રકાશીય ઉપકરણો (માઈક્રોસ્કોપ અને ટેલિસ્કોપ)ની ચર્ચામાં આપણે પ્રતિબિંબ અનંત અંતરે મળે છે તેવું ધારીશું.

વાસ્તવિક કેન્દ્રલંબાઈઓ માટે સાદા માઈક્રોસ્કોપ વડે મળતી વધુમાં વધુ મોટવણી મર્યાદિત (≤ 9) છે. આનાથી વધુ મોટવણી મેળવવા માટે બે લેન્સનો ઉપયોગ કરવામાં આવે છે, એક લેન્સની અસર બીજા લેન્સ દ્વારા મોટી થાય છે. આને *સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપ* કહે છે. સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપની રૂપરેખા આકૃતિ 9.28માં દર્શાવી છે. વસ્તુની નજીકના લેન્સને *વસ્તુકાચ* (*Objective*) કહે છે, જે વસ્તુનું સાચું, ઊલટું અને મોટું પ્રતિબિંબ આપે છે. આ પ્રતિબિંબ બીજા લેન્સ *નેત્રકાચ* (*Eye Piece*) માટે વસ્તુ તરીકે વર્તે છે, જે સાદા માઈક્રોસ્કોપ અથવા મેગ્નીફાયરની જેમ વર્તે છે, અને અંતિમ પ્રતિબિંબ આપે છે જે આભાસી અને મોટું હોય છે.



આકૃતિ 9.28 સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપ વડે રચાતા પ્રતિબિંબની કિરણાકૃતિ

પ્રથમ ઊલટું પ્રતિબિંબ આઈ-પીસના ફોકલ પ્લેન પર (અથવા અંદર) રચાય છે, જે અંતિમ પ્રતિબિંબ અનંત અંતરે આપે છે અથવા નજીક બિંદુ આગળ પ્રતિબિંબ રચાવા જરૂરી હોય તે કરતાં સહેજ નજીક આપે છે. સ્પષ્ટ છે કે, અંતિમ પ્રતિબિંબ વસ્તુને સાપેક્ષે ઊલટું મળે છે.

હવે આપણે સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપના કારણે મોટવણીનું સૂત્ર મેળવીશું. આકૃતિ (9.28) દર્શાવે છે કે ઓબ્જેક્ટીવને લીધે (રેખીય) મોટવણી,

$$m_0 = \frac{h'}{h} = \frac{L}{f_0} \qquad (9.43)$$

બરાબર છે, જ્યાં આપણે

$\tan\beta = \left(\frac{h}{f_0}\right) = \left(\frac{h'}{L}\right)$ સૂત્રનો ઉપયોગ કર્યો છે.

અહીં $L = B_1B'$ છે. અહીં h' પ્રથમ પ્રતિબિંબની ઊંચાઈ છે, h વસ્તુની ઊંચાઈ અને f_0 ઓબ્જેક્ટીવ લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ છે. પ્રથમ પ્રતિબિંબ આઈ-પીસના મુખ્ય કેન્દ્ર પાસે રચાય છે. ઓબ્જેક્ટીવ લેન્સના દ્વિતીય મુખ્ય કેન્દ્ર B_1 અને આઈ-પીસના પ્રથમ મુખ્ય કેન્દ્ર B' (કેન્દ્ર લંબાઈ f_e)વચ્ચેના અંતરને સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપની ટ્યૂબલેન્થ (અંતર L) કહે છે.

પ્રથમ ઊલટું પ્રતિબિંબ આઈ-પીસના મુખ્યકેન્દ્ર પાસે મળતું હોવાથી સાદા માઈક્રોસ્કોપ માટેની અગાઉની ચર્ચા મુજબ મળેલ પરિણામનો ઉપયોગ કરી આપણે તેને લીધે મળતી (કોણીય) મોટવણી m_e (સમીકરણ 9.39) મેળવીશું, જ્યારે અંતિમ પ્રતિબિંબ નજીક બિંદુ પર મળશે.

$$m_e = \left(1 + \frac{D}{f_e}\right) \qquad [9.44(a)]$$

જ્યારે અંતિમ પ્રતિબિંબ અનંત અંતરે મળે છે ત્યારે આઈ-પીસના કારણે કોણીય મોટવણી (સમીકરણ 9.42) મુજબ

$$m_e = (D/f_e) \qquad [9.44(b)]$$

આમ, પ્રતિબિંબ અનંત અંતરે મળે છે ત્યારે કુલ મોટવણી (સમીકરણ 9.33 પ્રમાણે),

$$m = m_o m_e = \left(\frac{L}{f_o}\right)\left(\frac{D}{f_e}\right) \qquad (9.45)$$

સ્પષ્ટ છે કે *સૂક્ષ્મ* વસ્તુનું મોટું વિવર્ધન મેળવવા માટે (એટલે જ માઈક્રોસ્કોપ નામ છે) ઓબ્જેક્ટીવ લેન્સ અને આઈપીસની કેન્દ્રલંબાઈ ઓછી હોવી જોઈએ. વ્યવહારમાં, 1 cm કરતાં વધારે ઓછી કેન્દ્રલંબાઈ બનાવવાનું અઘરું છે. વળી Lને મોટો કરવા માટે મોટા લેન્સ બનાવવા પડે છે. ઉદાહરણ તરીકે $f_o = 1.0$ cmના ઓબ્જેક્ટીવ, $f_e = 2.0$ cmના આઈપીસ અને ટ્યૂબલેન્થ 20 cm હોય તો,

$$m = m_o m_e = \left(\frac{L}{f_o}\right)\left(\frac{D}{f_e}\right)$$

$$= \frac{20}{1} \times \frac{25}{2} = 250$$

અન્ય ઘણી બાબતો જેમકે, વસ્તુની દીપ્તિમાન (પ્રકાશિતતા) (illumination) વિગેરે પણ પ્રતિબિંબની ગુણવત્તા અને દૃશ્યતામાં અસર કરે છે. આધુનિક માઈક્રોસ્કોપમાં ઓબ્જેક્ટીવ અને આઈ-પીસ બંને માટે બહુ-ઘટક લેન્સો વપરાય છે જેથી લેન્સની વિવિધ ત્રુટિઓનું (ક્ષતિઓનું) નિવારણ કરી પ્રતિબિંબની ગુણવત્તા સુધારી શકાય.

9.8.2 ટેલિસ્કોપ (Telescope)

ટેલિસ્કોપનો ઉપયોગ દૂરની કોણીય મોટવણી (આકૃતિ 9.29) મેળવવા માટે થાય છે. તેમાં પણ ઓબ્જેક્ટીવ અને આઈ-પીસ એમ બે લેન્સ હોય છે, પરંતુ અહીં ઓબ્જેક્ટીવની કેન્દ્રલંબાઈ અને વ્યાસ આઈ-પીસના પ્રમાણમાં ખૂબ જ મોટા રાખવામાં આવે છે. દૂરની વસ્તુમાંથી આવતાં કિરણો ઓબ્જેક્ટીવમાં દાખલ થઈ તેના દ્વિતીય મુખ્ય કેન્દ્ર પાસે નળીમાં તેનું વાસ્તવિક પ્રતિબિંબ રચે છે. આઈપીસ તેનું વિવર્ધિત એવું અંતિમ અને ઊલટું પ્રતિબિંબ રચે છે. અંતિમ પ્રતિબિંબ આંખ સાથે આંતરેલ ખૂણો (β) અને વસ્તુએ ઓબ્જેક્ટીવ (અથવા આંખ) સાથે આંતરેલ ખૂણો (α)ના ગુણોત્તરને ટેલિસ્કોપની મોટવશક્તિ (મોટવણી) (Magnifying Power) કહે છે. આથી,

$$m \approx \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{h}{f_e} \cdot \frac{f_o}{h} = \frac{f_o}{f_e} \qquad (9.46)$$

આ કિસ્સામાં ટેલિસ્કોપની ટ્યૂબ લંબાઈ $f_o + f_e$ છે.

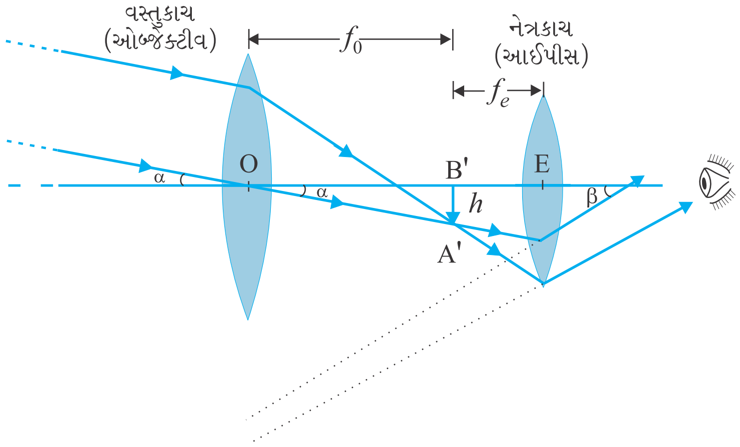
ટેરેસ્ટ્રિયલ ટેલિસ્કોપ (Terrestrial Teles-cope) માં ઈન્વર્ટીગ લેન્સની એક વધારાની જોડ હોય છે, જે અંતિમ પ્રતિબિંબ ચત્તું (સીધું) આપે છે.

રિફ્રેક્ટીંગ (વક્રીકારક) ટેલિસ્કોપનો ઉપયોગ ટેરેસ્ટ્રીયલ તેમજ એસ્ટ્રોનોમીકલ એમ બંને વસ્તુઓના અવલોકનો માટે થાય છે. ઉદાહરણ તરીકે, એક ટેલિસ્કોપના ઓબ્જેક્ટીવ લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ 100 cm અને આઈપીસની કેન્દ્રલંબાઈ 1 cm છે. આ ટેલિસ્કોપ માટે મોટવશક્તિ

$$m = 100/1 = 100.$$

The world's largest optical telescopes
http://astro.nineplanets.org/bigeyes.html

ધારોકે આ ટેલિસ્કોપ વડે 1' (એક મિનિટ ચાપ) જેટલું અંતર ધરાવતાં બે તારાઓનું નિરીક્ષણ કરવામાં આવે છે. આ તારાઓ એકબીજાથી $100 \times 1' = 100' = 1.67^{\circ}$ જેટલા કોણીય અંતરે હોય તેમ જણાશે.

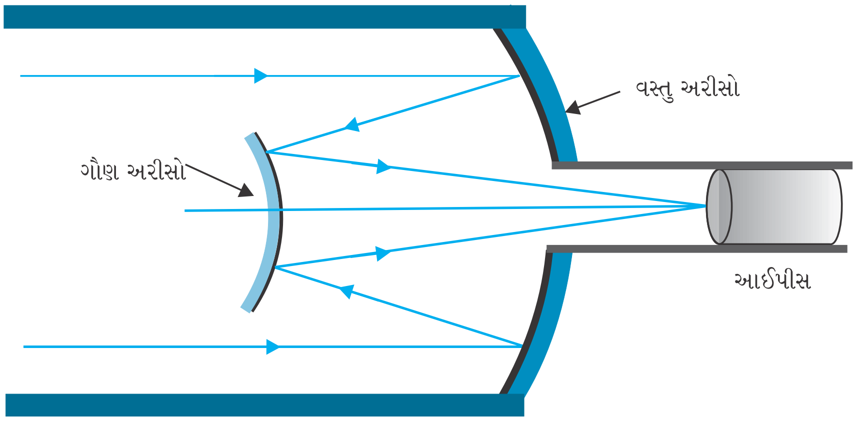


આકૃતિ 9.29 રિફ્રેક્ટીંગ (વક્રીકારક) ટેલિસ્કોપ

એસ્ટ્રોનોમીકલ ટેલિસ્કોપ માટે પ્રકાશ સમાવેશ ક્ષમતા (Light Gathering Power) અને તેનું વિભેદન અથવા વિભેદન શક્તિ (Resolving Power) મહત્વની બાબતો છે. આ પૈકી પ્રકાશ સમાવેશ ક્ષમતા સ્પષ્ટ રીતે ઓબ્જેક્ટીવના ક્ષેત્રફળ પર આધાર રાખે છે. મોટા વ્યાસવાળા લેન્સની મદદથી ઝાંખી વસ્તુઓ પણ જોઈ શકાય છે. વિભેદન શક્તિ અથવા નજીકની બે વસ્તુઓને અલગ-અલગ જોવાની ક્ષમતા પણ ઓબ્જેક્ટીવના વ્યાસ પર આધાર રાખે છે. આમ, પ્રકાશીય ટેલિસ્કોપ તેના ઓબ્જેક્ટીવનો વ્યાસ મોટો હોય તેવા બનાવવા જરૂરી છે. અત્યારે વપરાતા સૌથી મોટા ઓબ્જેક્ટીવ લેન્સનો વ્યાસ 40 ઈંચ (~ 1.02 m) જેટલો છે. આવો ટેલિસ્કોપ USAમાં Wisconsin ખાતે આવેલી Yerkes વેધશાળા (Observatory)માં છે. આવા મોટા લેન્સ ખૂબ જ વજનદાર હોય છે અને તેમને બનાવવાનું અને છેડા પાસેથી ટેકવવાનું ખૂબ જ મુશ્કેલ છે. વધુમાં એવા લેન્સ બનાવવાનું ખૂબ જ મુશ્કેલ અને ખર્ચાળ પણ છે કે જેઓ વર્ણવિપથન (Chromatic Aberration)થી અને વિકૃતિથી મુક્ત હોય તેવાં પ્રતિબિંબ આપે.

આવા કારણોસર આધુનિક ટેલિસ્કોપમાં ઓબ્જેક્ટીવ તરીકે લેન્સને બદલે અંતર્ગોળ અરીસાનો ઉપયોગ થાય છે. ઓબ્જેક્ટીવ તરીકે અરીસાનો ઉપયોગ થતો હોય તેવા ટેલિસ્કોપને *પરાવર્તક* (*Reflecting*) ટેલિસ્કોપ કહે છે. તેના કેટલાક ફાયદા છે. પ્રથમ તો અરીસા માટે વર્ણવિપથન હોતું નથી. બીજું, જો પારવલયિક (પેરાબોલિક) પરાવર્તક સપાટીનો ઉપયોગ કરવામાં આવે તો ગોળીય વિપથન (Spherical Aberration) પણ નાબૂદ થઈ શકે છે. અરીસાનું વજન સમાન પ્રકાશીય ક્ષમતા ધરાવતા લેન્સ કરતાં ઘણું ઓછું હોય છે. તેને માત્ર કિનારી પર નહિ પણ તેની પાછળની સમગ્ર સપાટી પર ટેકવી શકાય છે તેથી યાંત્રિક ટેકાનો પ્રશ્ન ઘણો ઘટી જાય છે.

પરાવર્તક ટેલિસ્કોપની એક સ્વભાવિક મુશ્કેલી એ છે કે, ઓબ્જેક્ટીવ અરીસો ટેલિસ્કોપ ટ્યૂબની અંદર જ પ્રકાશને કેન્દ્રિત કરે છે. આથી આઈ-પીસ અને અવલોકનકાર પણ ત્યાં જ હોવા જરૂરી છે. પરંતુ આનાથી થોડો પ્રકાશ (જે અવલોકનકારના પાંજરા પર આધારિત છે) અવરોધાય છે. કેલિફોર્નિયા ખાતે આવેલા Mt. Palomar ટેલિસ્કોપમાં આ માટે ખૂબ જ મોટો 200 ઈંચ ($\approx$ 5.08 m) નો વ્યાસ રાખવામાં આવ્યો છે. નાના પાંજરામાં અવલોકનકર્તા અરીસાના મુખ્યકેન્દ્ર પાસે બેસે છે. મુશ્કેલીના અન્ય ઉકેલમાં પ્રકાશને વિચલિત કરી એક બીજા અરીસા વડે કેન્દ્રિત કરાય છે. આવી એક રચનામાં ગૌણ



આકૃતિ 9.30 પરાવર્તક ટેલિસ્કોપ (કેસેગ્રેઈન)ની સંજ્ઞાત્મક આકૃતિ

બહિર્ગોળ અરીસા પરથી પરાવર્તિત થતાં કિરણો ઓબ્જેક્ટીવ પ્રાથમિક અરીસામાં રાખેલ છિદ્ર (Hole)માંથી પસાર થઈને આઈ-પીસ પર કેન્દ્રિત થાય છે, તે (આકૃતિ 9.30)માં દર્શાવેલ છે. આ ટેલિસ્કોપ તેના શોધકના નામ પરથી *કેસેગ્રેઈન* (*Cassegrain*) ટેલિસ્કોપ તરીકે જાણીતું છે. એમાં નાના ટેલિસ્કોપમાં મોટી કેન્દ્રલંબાઈ મેળવવાનો ફાયદો છે. ભારતમાં સૌથી મોટું ટેલિસ્કોપ તામિલનાડુમાં કાવાલૂર (Kavalur) ખાતે છે તે 2.34 m વ્યાસ ધરાવતું પરાવર્તક (કેસેગ્રેઈન) ટેલિસ્કોપ છે. તેને જમીન પર રાખી, પૉલીશ કરી ગોઠવીને તેનો ઉપયોગ ઈન્ડિયન ઈન્સ્ટિટ્યૂટ ઑફ એસ્ટ્રોફિઝિક્સ, બેંગ્લોર દ્વારા થાય છે. વિશ્વમાં સૌથી મોટા પરાવર્તક ટેલિસ્કોપ USAમાં હવાઈ (Hawaii) ખાતે આવેલા કેક (Keck) ટેલિસ્કોપની જોડ છે, જેમાં 10 m વ્યાસના પરાવર્તકો છે.

સારાંશ

1. પરાવર્તન $\angle i = \angle r'$ સૂત્ર દ્વારા અને વક્રીભવન સ્નેલનાં નિયમ $\sin i/\sin r = n$ દ્વારા સંચાલન પામે છે. જ્યાં આપાતકોણ, પરાવર્તનકોણ અને વક્રીભૂતકોણ અનુક્રમે i, r' અને r છે. જ્યાં આપાતકિરણ, પરાવર્તિતકિરણ અને વક્રીભૂતકિરણ અને લંબ એક જ સમતલમાં હોય છે.
2. ઘટ્ટ માધ્યમમાંથી પાતળા માધ્યમ પર આપાત થતાં કિરણ માટે *ક્રાંતિકોણ* i_c એ એવો કોણ છે કે જ્યારે વક્રીભૂતકિરણ 90°નો બને ત્યારે $i > i_c$ માટે પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય છે. હીરા ($i_c \cong 24.4^\circ$)માં થતું અનેક વારનું પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન પૂર્ણ પરાવર્તક પ્રિઝમો અને મરીચિકાની ઘટના એ પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનના કેટલાક ઉદાહરણો છે. કાચના ફાઈબરમાંથી બનાવેલા ઑપ્ટિકલ ફાયબરની ફરતે *ઓછા* વક્રીભવનાંક ધરાવતાં દ્રવ્યનું આવરણ કરેલું હોય છે. ફાઈબર વાંકા વાળેલા હોવા છતાં એક છેડા પાસેથી દાખલ થતો પ્રકાશ અનેકવાર પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન અનુભવી બીજા છેડેથી બહાર આવે છે.
3. *કાર્તેઝિયન સંજ્ઞા પ્રણાલી* : આપાતકિરણની દિશામાં માપેલા અંતરો ધન અને તેની વિરુદ્ધ દિશામાં માપેલા અંતરો ઋણ ગણવામાં આવે છે. બધા જ અંતરો અરીસા/લેન્સના ધ્રુવ/ઑપ્ટિકલ કેન્દ્રથી મુખ્ય અક્ષ પર માપવામાં આવે છે. x-અક્ષની ઉપર તરફ અને મુખ્ય અક્ષને લંબ માપેલ ઊંચાઈ ધન ગણાય છે. અધો દિશામાં માપેલ ઊંચાઈ ઋણ ગણાય છે.

4. *અરીસાનું સૂત્ર* :

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$$

જ્યાં u વસ્તુઅંતર, v પ્રતિબિંબ અંતર છે અને કેન્દ્રલંબાઈ f એ વક્રતાત્રિજ્યા R કરતાં (લગભગ) અડધી હોય છે. અંતર્ગોળ અરીસા માટે f ઋણ અને બહિર્ગોળ અરીસા માટે f ધન છે.

5. પ્રિઝમકોણ A અને વક્રીભવનાંક n_2 ધરાવતાં પ્રિઝમને n વક્રીભવનાંક ધરાવતાં માધ્યમમાં મૂકતાં,

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin[(A + D_m)/2]}{\sin(A/2)}$$

જ્યાં, D_m લઘુત્તમ વિચલન કોણ છે.

6. *ગોળીય આંતર સપાટી દ્વારા થતાં વક્રીભવન* માટે, (માધ્યમ-1 અને 2ના વક્રીભવનાંક અનુક્રમે n_1 અને n_2 છે.)

$$\frac{n_2}{v} - \frac{n_1}{u} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

પાતળા લેન્સ માટે,

$$\frac{1}{v} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$$

લેન્સ મેકરનું સૂત્ર

$$\frac{1}{f} = \frac{(n_2 - n_1)}{n_1}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

R_1 અને R_2 લેન્સની વક્રસપાટીઓની વક્રતાત્રિજ્યાઓ છે. અભિસારી (Converging) લેન્સ માટે f ધન અને અપસારી (Diverging) લેન્સ માટે f ઋણ હોય છે. લેન્સનો પાવર $P = 1/f$

લેન્સના પાવરનો SI એકમ ડાયોપ્ટર (D) છે : $1\ D = 1\ m^{-1}$. $f_1, f_2, f_3, \ldots$ કેન્દ્રલંબાઈ ધરાવતાં લેન્સને સંપર્કમાં રાખવામાં આવે તો તેમની અસરકારક કેન્દ્રલંબાઈ f પરથી મળે છે.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_1} + \ldots$$

વિવિધ લેન્સના સંયોજનનો કુલ પાવર $P = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots$

7. પ્રકાશની તેના ઘટક રંગોમાં છૂટા પડવાની ઘટનાને *વિભાજન* કહે છે.

8. *સાદા માઈક્રોસ્કોપ માટે મોટવશક્તિ*, $m = 1 + (D/f)$ પરથી મળે છે, જ્યાં D = 25 cm નજીક બિંદુ અંતર છે અને f બહિર્ગોળ લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ છે. જો પ્રતિબિંબ અનંત અંતરે મળે તો, $m = D/f$ થાય.

સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપ માટે મોટવશક્તિ $m = m_e \times m_0$ મળે છે જ્યાં $m_e = 1 + D/f_e$ જે આઈપીસને લીધે મોટવણી છે. અને m_0 ઓબ્જેક્ટીવથી મળતી મોટવણી છે.

$$m = \frac{L}{f_0} \times \frac{D}{f_e} \quad (\text{આશરે})$$

જ્યાં f_0 ઓબ્જેક્ટીવની કેન્દ્રલંબાઈ, f_e આઈપીસની કેન્દ્રલંબાઈ અને L બંનેનાં મુખ્યકેન્દ્ર વચ્ચેનું અંતર છે.

9. *ટેલિસ્કોપની મોટવ શક્તિ*, પ્રતિબિંબ વડે આંખ આગળ આંતરાતા કોણ β અને વસ્તુ વડે આંખ આગળ આંતરાતા કોણ αનો ગુણોત્તર છે.

$$m = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{f_0}{f_e}$$

જ્યાં f_0 અને f_e અનુક્રમે ઓબ્જેક્ટીવ અને આઈપીસની કેન્દ્રલંબાઈ છે.

ગહન વિચારણાના મુદ્દા

1. આપાતબિંદુ પાસે પરાવર્તન અને વક્રીભવનનાં નિયમો તમામ સપાટીઓ માટે અને માધ્યમોની જોડ માટે સાચાં છે.
2. જ્યારે બહિર્ગોળ લેન્સની સામે વસ્તુ f અને $2f$ની વચ્ચે રાખવામાં આવે છે ત્યારે પ્રતિબિંબના સ્થાન પાસે પડદો રાખતાં પડદા પર વાસ્તવિક પ્રતિબિંબ જોઈ શકાય છે. હવે જો પડદાને દૂર કરવામાં આવે તો શું પ્રતિબિંબ હજી ત્યાં જ હશે ? આ પ્રશ્ન ઘણાને મૂંઝવે છે. કારણકે, પડદા વગરના પ્રતિબિંબને હવામાં લટકતું કલ્પવામાં આપણને તકલીફ થાય છે. પરંતુ પડદો દૂર કરતાં પણ પ્રતિબિંબ ત્યાં હોય છે જ. વસ્તુ પરના આપેલ બિંદુમાંથી આવતાં કિરણો હવામાં જ પ્રતિબિંબ બિંદુએ અભિસરણ પામીને પછી એકબીજાથી દૂર અપસારિત થાય છે. પડદો આ કિરણોને માત્ર વિખેરે (diffuses) છે. જે પૈકી કેટલાંક કિરણો આપણી આંખમાં પ્રવેશે છે અને પરિણામે પ્રતિબિંબ જોઈ શકાય છે. આ હકીકત લેસર-શો દરમ્યાન પડદા વગર હવામાં રચાતા પ્રતિબિંબ દ્વારા જોઈ શકાય છે.
3. પ્રતિબિંબની રચના માટે નિયમિત પરાવર્તન/વક્રીભવનની જરૂર છે. સિદ્ધાંતમાં આપેલા બિંદુમાંથી નિકળતાં બધાં જ કિરણો એક જ સમાન પ્રતિબિંબ બિંદુએ પહોંચવા જોઈએ. આજ કારણોસર અનિયમિત પરાવર્તક સપાટી દા. ત. પુસ્તકનું પાનું-માં તમે તમારું પ્રતિબિંબ જોઈ શકતા નથી.
4. જાડા લેન્સ વિભાજનના કારણે રંગીન પ્રતિબિંબો આપે છે. આપણી આસપાસ વસ્તુઓના જે વિવિધ રંગો આપણે જોઈએ છીએ તે તેમની પર આપાત પ્રકાશના વિવિધ ઘટક રંગોના કારણે છે. સફેદ પ્રકાશમાં જે રંગ દેખાય છે તે કરતાં એકરંગી પ્રકાશ વસ્તુના રંગ અંગે સંપૂર્ણ જુદો જ ખ્યાલ ઉપજાવી શકે છે.
5. સાદા માઈક્રોસ્કોપ માટે, વસ્તુનું કોણીય પરિમાણ અને પ્રતિબિંબનું કોણીય પરિમાણ સમાન હોય છે. છતાં તે મોટું દેખાય છે. કારણ કે, આપણે નાની વસ્તુને આંખથી 25 cmથી વધુ નજીક રાખી શકીએ છે, જેથી એ મોટો કોણ આંતરે છે. પ્રતિબિંબ 25 cm અંતરે છે જે આપણે જોઈ શકીએ છીએ. માઈક્રોસ્કોપ વગર, નાની સૂક્ષ્મ વસ્તુને તમારે 25 cm દૂર મૂકવાની જરૂર છે, જે ખૂબ જ નાનો કોણ આંતરે છે.

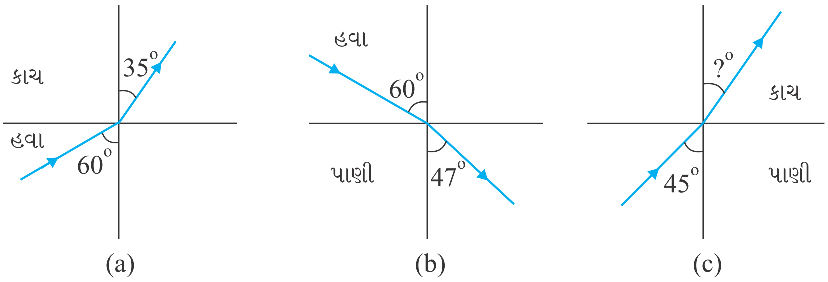
સ્વાધ્યાય

9.1 36 cm વક્રતાત્રિજ્યા ધરાવતાં અંતર્ગોળ અરીસાની સામે 2.5 cm ઊંચાઈની એક નાની મીણબત્તી 27 cm અંતરે મૂકવામાં આવે છે. મીણબત્તીનું સ્પષ્ટ પ્રતિબિંબ મેળવવા માટે પડદાને અરીસાથી કેટલા અંતરે મૂકવો જોઈએ ? પ્રતિબિંબનો પ્રકાર અને ઊંચાઈ જણાવો. જો મીણબત્તીને અરીસાની નજીક ખસેડવામાં આવે તો પડદાને કેવી રીતે ખસેડવો પડે ?

9.2 15 cm કેન્દ્રલંબાઈ ધરાવતાં બહિર્ગોળ અરીસાથી 4.5 cm ઊંચાઈવાળી સોયને 12 cm દૂર મૂકવામાં આવે છે. પ્રતિબિંબનું સ્થાન અને મોટવણી આપો. સોયને અરીસાથી જેમ દૂર ખસેડવામાં આવે તેમ શું થશે તે જણાવો.

9.3 એક ટાંકીને 12.5 cmની ઊંચાઈ સુધી પાણીથી ભરવામાં આવે છે. ટાંકીના તળિયે રહેલી સોયની આભાસી ઊંડાઈ માઈક્રોસ્કોપ વડે માપતાં તે 9.4 cm મળે છે. પાણીનો વક્રીભવનાંક કેટલો હશે ? જો 1.63 વક્રીભવનાંક ધરાવતાં પ્રવાહીને પાણીના બદલે તેટલી જ ઊંચાઈએ ભરવામાં આવે તો, સોય પર ફરીથી માઈક્રોસ્કોપને કેન્દ્રિત કરવા માટે તેને કેટલા અંતરે ખસેડવું પડે ?

9.4 હવામાં ગતિ કરતું કિરણ કાચ-હવા અને પાણી-હવાની સપાટીએ રચેલા લંબ સાથે 60°ના ખૂણે આપાત થાય છે. જેનાં વક્રીભવન આકૃતિઓ અનુક્રમે 9.31(a) અને (b) દર્શાવે છે.



આકૃતિ 9.31

પાણી-કાચની આંતર સપાટીએ રચેલા લંબ સાથે પાણીમાં 45°નો આપાતકોણ હોય ત્યારે કાચમાં વક્રીભવનકોણનું મૂલ્ય શોધો [આકૃતિ 9.31(c)].

9.5 80 cm ઉંડાઈ સુધી પાણી ભરેલી ટાંકીના તળિયે એક નાનો બલ્બ મૂક્યો છે. બલ્બમાંથી ઉત્સર્જિત થતો પ્રકાશ પાણીની સપાટી પાસેથી કેટલા ક્ષેત્રફળમાંથી બહાર આવશે ? પાણીનો વક્રીભવનાંક 1.33 છે (બલ્બને બિંદુવત ઉદ્‌ગમ તરીકે ગણો).

9.6 અજ્ઞાત વક્રીભવનાંક ધરાવતાં કાચમાંથી એક પ્રિઝમ બનાવેલ છે. તેની એક સપાટી ઉપર પ્રકાશનું સમાંતર કિરણજૂથ આપાત કરવામાં આવે છે. લઘુત્તમ વિચલન કોણ 40° મળે છે. પ્રિઝમના દ્રવ્યનો વક્રીભવનાંક શોધો. પ્રિઝમનો વક્રતાકારક કોણ 60° છે. જો આ પ્રિઝમને (1.33 વક્રીભવનાંક ધરાવતાં) પાણીમાં મૂકવામાં આવે તો સમાંતર કિરણજૂથ માટે લઘુત્તમ વિચલન કોણ શોધો.

9.7 1.55 વક્રીભવનાંક ધરાવતાં કાચમાંથી બંને સપાટીઓની વક્રતાત્રિજ્યા સમાન હોય તેવા દ્વિ-બહિર્ગોળ લેન્સ બનાવવો છે તો 20 cm કેન્દ્રલંબાઈ મેળવવા માટે જરૂરી વક્રતાત્રિજ્યા કેટલી હશે ?

9.8 પ્રકાશની કિરણાવલી કોઈ એક બિંદુ P પાસે કેન્દ્રિત થાય છે. જો માર્ગમાં P બિંદુથી 12 cmના અંતરે (a) 20 cm કેન્દ્રલંબાઈવાળો બહિર્ગોળ લેન્સ અને (b) 16 cm કેન્દ્રલંબાઈવાળો અંતર્ગોળલેન્સ મૂકવામાં આવે તો, આ કિરણાવલી કયા બિંદુએ કેન્દ્રિત થશે ?

9.9 21 cm કેન્દ્રલંબાઈવાળા અંતર્ગોળ લેન્સની સામે 14 cmનાં અંતરે, 3.0 cmની ઊંચાઈની એક વસ્તુ મૂકેલી છે. લેન્સ વડે મળતાં પ્રતિબિંબનું વર્ણન કરો. જો વસ્તુને લેન્સથી વધુ દૂર લઈ જવામાં આવે તો શું થશે ?

9.10 30 cm કેન્દ્રલંબાઈના બહિર્ગોળ લેન્સને 20 cm કેન્દ્રલંબાઈના અંતર્ગોળ લેન્સ સાથે સંપર્કમાં રાખ્યો છે. આ સંયોજનની સમતુલ્ય કેન્દ્રલંબાઈ શોધો. આ સંયોજન (તંત્ર) અભિસારી (બહિર્ગોળ) લેન્સ હશે કે અપસારી (અંતર્ગોળ) લેન્સ હશે ? લેન્સની જાડાઈ અવગણો.

9.11 2.0 cm કેન્દ્રલંબાઈનો ઓબ્જેક્ટીવ અને 6.25 cm કેન્દ્રલંબાઈના આઈપીસ ધરાવતાં સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપમાં તે બે લેન્સ વચ્ચેનું અંતર 15 cm છે. વસ્તુને ઓબ્જેક્ટીવથી કેટલા અંતરે રાખવી જોઈએ કે જેથી મળતું અંતિમ પ્રતિબિંબ (a) નજીકબિંદુ અંતરે (25 cm) અને (b) અનંત અંતરે મળે ? બંને કિસ્સામાં માઈક્રોસ્કોપની મોટવશક્તિ શોધો.

9.12 સામાન્ય નજીકબિંદુ (25 cm) ધરાવતો એક વ્યક્તિ 8.0 mm કેન્દ્રલંબાઈવાળા ઓબ્જેક્ટીવ અને 2.5 cm કેન્દ્રલંબાઈના આઈપીસ ધરાવતા સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપ વડે, ઓબ્જેક્ટીવથી 9.0 mm દૂર રાખેલી વસ્તુનું સ્પષ્ટ પ્રતિબિંબ મેળવે છે. બંને લેન્સ વચ્ચેનું અંતર શોધો. માઈક્રોસ્કોપની મોટવણી શક્તિ પણ શોધો.

9.13 એક નાના ટેલિસ્કોપના ઓબ્જેક્ટીવની કેન્દ્રલંબાઈ 144 cm અને આઈપીસની કેન્દ્રલંબાઈ 6.0 cm છે. ટેલિસ્કોપની મોટવશક્તિ તથા ઓબ્જેક્ટીવ અને આઈપીસ વચ્ચેનું અંતર શોધો.

9.14 (a) એક વેધશાળામાં આવેલ વિશાળ વક્રીકારક ટેલિસ્કોપમાં ઓબ્જેક્ટીવ લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ 15 m અને આઈપીસની કેન્દ્રલંબાઈ 1 cm છે. તો કોણીય મોટવણી શોધો. (b) આ ટેલિસ્કોપના ઓબ્જેક્ટીવ વડે મળતાં ચંદ્રના પ્રતિબિંબનો વ્યાસ કેટલો હશે ? ચંદ્રનો વ્યાસ 3.48×10^6 m અને ચંદ્રની કક્ષાની ત્રિજ્યા 3.8×10^8 m છે.

9.15 અરીસાના સૂત્રનો ઉપયોગ કરી સાબિત કરો કે :

(a) અંતર્ગોળ અરીસાના f અને $2f$ની વચ્ચે વસ્તુને મૂકવામાં આવે તો વસ્તુનું સાચું પ્રતિબિંબ $2f$થી દૂર મળે.

(b) બહિર્ગોળ અરીસો હંમેશા વસ્તુના સ્થાનથી સ્વતંત્ર એવું આભાસી પ્રતિબિંબ જ આપે છે.

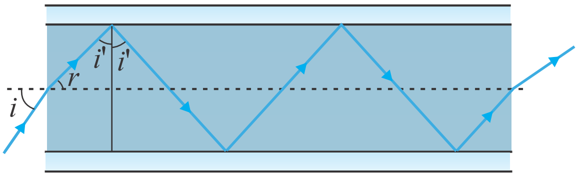
(c) બહિર્ગોળ અરીસા વડે મળતું આભાસી પ્રતિબિંબ હંમેશા કદમાં નાનું અને અરીસાના ધ્રુવ તેમજ મુખ્યકેન્દ્રની વચ્ચે જ હોય છે.

(d) અંતર્ગોળ અરીસાના ધ્રુવ અને મુખ્યકેન્દ્ર વચ્ચે મુકેલ વસ્તુનું પ્રતિબિંબ કદમાં મોટું અને આભાસી હોય છે. [આ સ્વાધ્યાય કિરણ આકૃતિઓથી મળતા પ્રતિબિંબના ગુણધર્મો તમને બીજગણિતથી મેળવવામાં મદદ કરે છે.]

9.16 ટેબલની સપાટી ઉપર જડી દીધેલી નાની પીનને 50 cm ઊંચાઈથી જોવામાં આવે છે. આ જ બિંદુએ, ઉપરથી બિંદુથી ટેબલની સપાટીને સમાંતર રાખેલા 15 cm જાડાઈના કાચના સ્લેબમાંથી તેને જોતાં, પીન કેટલી ઊંચે આવેલી દેખાશે ? કાચનો વક્રીભવનાંક 1.5 છે. ઉપર મેળવેલ જવાબ સ્લેબના સ્થાન ઉપર આધાર રાખે ?

9.17 (a) આકૃતિ 9.32માં કાચના ફાઈબરમાંથી બનાવેલ 1.68 વક્રીભવનાંક ધરાવતી 'પ્રકાશનળી'નો આડછેદ દર્શાવ્યો છે. બહારની બાજુએ 1.44 વક્રીભવનાંક ધરાવતા દ્રવ્યનું આવરણ કરેલું છે. આકૃતિમાં દર્શાવ્યા મુજબ આપાતકિરણનું પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થઈ શકે તે માટે જરૂરી આપાતકિરણોના નળીને અક્ષ સાથેના કોણનો વિસ્તાર રેન્જ (Range) જણાવો.

(b) જો પાઈપની બહારની બાજુએ કોઈ આવરણ ના કરવામાં આવે તો તમારો જવાબ શું છે ?



આકૃતિ 9.32

9.18 નીચેના પ્રશ્નોનાં જવાબ આપો :

(a) તમે એવું ભણી ગયા છો કે સમતલ અને બહિર્ગોળ અરીસાઓ વસ્તુનું આભાસી પ્રતિબિંબ આપે છે. શું તેઓ દ્વારા અમુક પરિસ્થિતિઓમાં સાચું પ્રતિબિંબ મેળવી શકાય ? સમજાવો.

(b) આપણે હંમેશા કહીએ છીએ કે, આભાસી પ્રતિબિંબને પડદા ઉપર ઝીલી શકાતું નથી. છતાં, આપણે જ્યારે આભાસી પ્રતિબિંબને ''જોઈએ'' છીએ ત્યારે સ્વભાવિક છે કે આપણે તેને આંખના પડદા (રેટિના) પર ઝીલીએ છીએ. શું અહીં કોઈ વિરોધાભાસ છે ?

(c) પાણીની અંદરથી (Under Water) એક વ્યક્તિ તળાવના કિનારે ઊભા રહેલા એક માછીમારને ત્રાંસી રીતે (Obliquely) જુએ છે, તો તેને આ માછીમાર તેની ખરેખરી ઊંચાઈ કરતાં લાંબો દેખાશે કે ટૂંકો ?

(d) જો ત્રાંસી દિશામાં જોવામાં આવે તો, પાણીની ટાંકીની આભાસી ઊંડાઈ બદલાશે ? જો 'હા' તો તે આભાસી ઊંડાઈ વધારે હશે કે ઓછી ?

(e) સાદા કાચ કરતાં હીરાનો વક્રીભવનાંક ઘણો મોટો હોય છે. આ હકીકત હીરાઘસુને કોઈ રીતે ઉપયોગી છે ?

9.19 ઓરડાની એક દિવાલ સાથે જડિત નાના વિદ્યુત બલ્બનું 3 m દૂર આવેલી સામેની દિવાલ પર પ્રતિબિંબ મેળવવા માટે બહિર્ગોળ લેન્સની શક્ય મહત્તમ કેન્દ્રલંબાઈ શોધો.

9.20 વસ્તુથી 90 cm દૂર એક પડદો રાખ્યો છે. એકબીજાથી 20 cm અંતરે આવેલા હોય તેવા બે સ્થાનો આગળ વારાફરતી એક બહિર્ગોળ લેન્સ મુકતાં પ્રતિબિંબ તે જ પડદા પર મળે છે. તો લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ શોધો.

9.21 (a) સ્વાધ્યાય 9.10માં સંપાત થતી મુખ્ય અક્ષ પર બે લેન્સો વચ્ચેનું અંતર 8.0 cm હોય તો સંયોજનની અસરકારક કેન્દ્રલંબાઈ શોધો. આ જવાબ, સંયોજનની કઈ તરફથી પ્રકાશની સમાંતર કિરણાવલી (Beam) આપાત કરવામાં આવે છે તેના પર આધારિત છે ? શું સંયોજનની અસરકારક કેન્દ્રલંબાઈનો ખ્યાલ સ્હેજ પણ ઉપયોગી છે ?

(b) ઉપર્યુક્ત ગોઠવણી (a)માં 1.5 cm ઊંચાઈની એક વસ્તુને બહિર્ગોળ લેન્સ તરફ 40 cm અંતરે મૂકવામાં આવે છે બે લેન્સનાં સંયોજનથી મળતી મોટવણી અને પ્રતિબિંબની ઊંચાઈ શોધો.

9.22 60°નો વક્રતાકારકકોણ ધરાવતા પ્રિઝમની સપાટી પર કેટલા લઘુત્તમ આપાતકોણે આપાત થતા કિરણનું બીજી સપાટીએથી સહેજ (Just) પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તન થાય ? પ્રિઝમના દ્રવ્યનો વક્રીભવનાંક 1.524 છે.

9.23 1 mm^2ના ચોરસોમાં વિભાગેલા એક સમતલ ટુકડાને 9 cm કેન્દ્રલંબાઈના વિવર્ધક (અભિસારી) લેન્સ વડે જોવામાં આવે છે. આ લેન્સ ટુકડાથી 9 cm દૂર આંખની નજીક રાખ્યો છે.

(a) લેન્સની મોટવણી શોધો. ટુકડાના આભાસી પ્રતિબિંબમાં દરેક ચોરસનું ક્ષેત્રફળ શોધો.

(b) લેન્સની કોણીય મોટવણી (મોટવશક્તિ) શોધો.

(c) (a)માં મેળવેલ મોટવણી અને (b)માં મેળવેલ મોટવશક્તિ સમાન છે ? સમજાવો.

9.24 (a) સ્વાધ્યાય 9.29માં સમતલમાંની આકૃતિથી લેન્સને કેટલા અંતરે રાખવો જોઈએ જેથી મહત્તમ શક્ય મોટવશક્તિ સાથે ચોરસો સ્પષ્ટ દેખાય ?

(b) આ કિસ્સામાં મોટવણી કેટલી મળશે ?

(c) શું મોટવણી અને મોટવશક્તિ આ કિસ્સામાં સમાન છે ? સમજાવો.

9.25 સ્વાધ્યાય 9.30માં જો દરેક ચોરસના આભાસી પ્રતિબિંબનું ક્ષેત્રફળ 6.25 mm^2 મેળવવું હોય તો વસ્તુ અને વિવર્ધક કાચ વચ્ચેનું અંતર કેટલું રાખવું જોઈએ ? જો આંખને આ વિવર્ધક કાચની ખુબ જ નજીક રાખવામાં આવે તો ચોરસને તમે સ્પષ્ટ જોઈ શકશો ? (નોંધ : સ્વાધ્યાય 9.29 થી 9.31 નિરપેક્ષ પરિમાણમાં મોટવણી અને સાધનની કોણીય મોટવણી (મોટવશક્તિ) વચ્ચેનો તફાવત સમજવામાં ઉપયોગી થશે.)

9.26 નીચેના પ્રશ્નોના ઉત્તર આપો :

(a) વસ્તુએ આંખ સાથે બનાવેલો ખૂણો અને વિવર્ધક લેન્સથી રચાયેલા તેના આભાસી પ્રતિબિંબે આંખ સાથે બનાવેલો ખૂણો સમાન છે. તો પછી વિવર્ધક કાચ કયા અર્થમાં કોણીય મોટવણી આપે છે ?

(b) સામાન્ય રીતે કોઈ પણ વ્યક્તિ વિવર્ધક કાચમાંથી વસ્તુને જોવા માટે આંખને લેન્સની ઘણી નજીક રાખે છે. જો આંખને દૂર રાખવામાં આવે તો કોણીય મોટવણીમાં ફેરફાર થાય ?

(c) સાદા માઈક્રોસ્કોપની મોટવશક્તિ કેન્દ્રલંબાઈના વ્યસ્ત પ્રમાણમાં છે. તો વધુને વધુ મોટવણી મેળવવા માટે ઓછામાં ઓછી કેન્દ્રલંબાઈનો લેન્સ વાપરવામાં આપણને કયું કારણ રોકી રહ્યું છે ?

(d) સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપમાં ઓબ્જેક્ટીવ અને આઈપીસ બંનેની કેન્દ્રલંબાઈ નાની શા માટે રાખવામાં આવે છે ?

(e) સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપમાંથી જોવામાં આંખને આઈપીસની અડોઅડ નહીં પરંતુ સહેજ દૂર રાખવામાં આવે છે. શા માટે ? આઈપીસ અને આંખ વચ્ચેનું આ નાનું અંતર કેટલું હોવું જોઈએ ?

9.27 1.25 cm કેન્દ્રલંબાઈના ઓબ્જેક્ટીવ અને 5 cm કેન્દ્રલંબાઈના આઈપીસ વડે 30X કોણીય મોટવણી (મોટવશક્તિ) મેળવવી હોય તો સંયુક્ત માઈક્રોસ્કોપની ગોઠવણી કઈ રીતે કરવી જોઈએ ?

9.28 એક નાના ટેલિસ્કોપમાં 140 cm કેન્દ્રલંબાઈનો ઓબ્જેક્ટીવ અને 5 cm કેન્દ્રલંબાઈનો આઈપીસ છે. આ ટેલિસ્કોપની મોટવશક્તિ,

(a) જ્યારે ટેલિસ્કોપની સામાન્ય ગોઠવણી કરેલ હોય. (અંતિમ પ્રતિબિંબ અનંત અંતરે મળતું હોય) ત્યારે અને

(b) જ્યારે અંતિમ પ્રતિબિંબ નજીક બિંદુ અંતરે (25 cm) મળતું હોય ત્યારે શોધો.

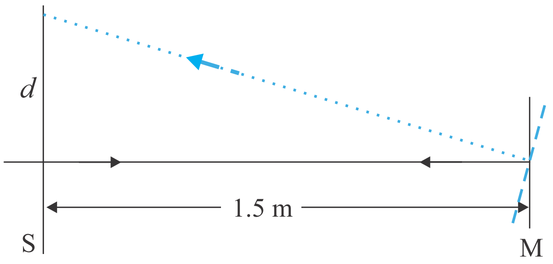
9.29 (a) સ્વાધ્યાય 9.28(a)માં દર્શાવેલ ટેલિસ્કોપ માટે ઓબ્જેક્ટીવ અને આઈપીસ વચ્ચેનું અંતર કેટલું હશે ?

(b) જો આ ટેલિસ્કોપનો 3 km દૂર આવેલા 100 m ઊંચાઈના ટાવરને જોવા માટે ઉપયોગ કરવામાં આવે તો ઓબ્જેક્ટીવ લેન્સ વડે રચાતા ટાવરના પ્રતિબિંબની ઊંચાઈ શોધો.

(c) જો ટાવરનું અંતિમ પ્રતિબિંબ 25 cm અંતરે મેળવવામાં આવે તો પ્રતિબિંબની ઊંચાઈ શોધો.

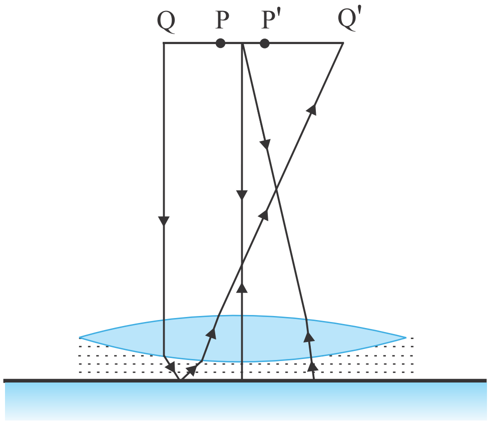
9.30 એક કેસેગ્રેઈન (Cassegrain) ટેલિસ્કોપમાં આકૃતિ 9.30માં બતાવ્યા મુજબ બે અરીસાઓ વાપરવામાં આવે છે. આ ટેલિસ્કોપમાં અરીસાઓ એકબીજાથી 20 mm અંતરે રાખેલ છે. મોટા અરીસાની વક્રતાત્રિજ્યા 220 mm અને નાના અરીસાની 140 mm હોય તો અનંત અંતરે રહેલી વસ્તુનું અંતિમ પ્રતિબિંબ ક્યાં મળશે ?

9.31 ગૅલ્વેનોમીટરના ગૂંચળા (કોઈલ) સાથે જોડેલ સમતલ અરીસાની ઉપર લંબરૂપે આપાત કરેલ કિરણ આકૃતિ 9.33માં બતાવ્યા પ્રમાણે તે જ માર્ગે પાછું ફરે છે. ગૂંચળામાંથી પસાર થતાં વિદ્યુતપ્રવાહનાં કારણે અરીસો 3.5°નું કોણાવર્તન અનુભવે છે. અરીસાથી 1.5 m દૂર મૂકેલા પડદા ઉપર પરાવર્તિત કિરણના બિન્દુ (Stop) નું સ્થાનાંતર કેટલું હશે ?



આકૃતિ 9.33

9.32 આકૃતિ (9.34)માં એક બહિર્ગોળ લેન્સ કે જેની બંને બાજુની વક્રતાત્રિજ્યાઓ સમાન છે, (વક્રીભવનાંક 1.5 છે) તેને પ્રવાહીના સંપર્કમાં, સમતલ અરીસા પર મૂકેલો છે. એક નાની સોયને મુખ્ય અક્ષ પર રહે તે રીતે, તેનું ઊલટું પ્રતિબિંબ એ સોયના સ્થાને જ દેખાય ત્યાં સુધી ખસેડવામાં આવે છે. પીનનું લેન્સથી અંતર 45.0 cm છે. હવે પ્રવાહીને દૂર કરી પ્રયોગનું પુનરાવર્તન કરતાં આ અંતર 30.0 cm મળે છે. તો પ્રવાહીનો વક્રીભવનાંક શોધો.



આકૃતિ 9.34

નોંધ

નોંધ

પ્રકરણ દસ

તરંગ પ્રકાશશાસ્ત્ર (WAVE OPTICS)

10.1 પ્રસ્તાવના (INTRODUCTION)

ઈ.સ. 1637માં ડેકાર્ટિસે પ્રકાશ માટેનો કણવાદ (Corpuscular–કોર્પસ્ક્યુલર Theory) આપ્યો અને સ્નેલનો નિયમ તારવ્યો. તેણે બે માધ્યમોના આંતરપૃષ્ઠ (Interface) આગળ પ્રકાશના પરાવર્તન અને વક્રીભવનના નિયમો સમજાવ્યા. આ કણવાદે એવી આગાહી કરી કે જો પ્રકાશ કિરણ વક્રીભવન થતાં લંબ તરફ વાંકુ વળે તો બીજા માધ્યમમાં પ્રકાશની ઝડપ વધારે હશે. આ કણવાદને આઈઝેક્ ન્યૂટન દ્વારા તેમના પ્રચલિત પુસ્તક, 'OPTICKS' દ્વારા આગળ વિકસાવવામાં આવ્યો અને આ પુસ્તકની પ્રચંડ લોકપ્રિયતાને કારણે કણવાદ (Corpuscular Model) ન્યૂટને આપ્યો હોવાનું માનવામાં આવે છે.

ઈ.સ. 1678માં, ડચ્ ભૌતિકવિજ્ઞાની, ક્રિશ્ચિયન હાઈગેન્સ દ્વારા પ્રકાશનો તરંગવાદ રજૂ થયો – પ્રકાશ માટેનો આ તરંગવાદ આપણે આ પ્રકરણમાં ચર્ચીશું. આપણે જોઈશું કે, આ તરંગવાદ સંતોષકારક રીતે પરાવર્તન અને વક્રીભવનની ઘટના સમજાવી શકે છે, પરંતુ તે એવી આગાહી કરે છે કે જો વક્રીભવન દરમિયાન તરંગ લંબ તરફ વાંકુ વળે તો બીજા માધ્યમમાં પ્રકાશની ઝડપ ઓછી હશે. આ પ્રકાશના કણવાદ દ્વારા થયેલ અનુમાનની સાથે વિરોધાભાસ ધરાવે છે. એ તો ઘણા સમય બાદ પ્રાયોગિક રીતે, અનુમોદિત થયું કે, પાણીમાં પ્રકાશની ઝડપ એ હવામાંની ઝડપ કરતાં ઓછી હોય છે, કે જે તરંગવાદના અનુમાનની પુષ્ટી કરે છે. આ પ્રયોગ 1850માં ફોકલ્ટ (Foucult) દ્વારા કરવામાં આવ્યો હતો.

પ્રારંભમાં ન્યૂટનની સત્તા/પ્રભાવને કારણે તેમજ તે સમયે તેવું માનવામાં આવતું હતું કે તરંગોને પ્રસરણ માટે હંમેશા માધ્યમની જરૂર પડે છે, પરંતુ પ્રકાશ તો શૂન્યાવકાશમાંથી પણ પસાર થતો હતો તે કારણે પણ તરંગવાદ સહેલાઈથી સ્વીકારવામાં આવ્યો ન હતો. પરંતુ જ્યારે થોમસ યંગે ઈ.સ. 1801માં તેમનો વિખ્યાત વ્યતિકરણ માટેનો પ્રયોગ કર્યો, ત્યારે દૃઢતાથી એવું સ્થાપિત થયું કે ખરેખર પ્રકાશ એ તરંગ ઘટના છે. દૃશ્ય પ્રકાશની તરંગલંબાઈ મપાઈ હતી અને તે ખૂબ નાની હોવાની માલૂમ પડી હતી; ઉદાહરણ તરીકે પીળા પ્રકાશની તરંગલંબાઈ લગભગ 0.6 μm જેટલી છે. દૃશ્ય પ્રકાશની તરંગલંબાઈ (લાક્ષણિક અરીસા અને લેન્સના પરિમાણની સરખામણીમાં) પ્રમાણમાં ઘણી નાની હોવાથી એવું ધારી શકાય છે કે પ્રકાશ લગભગ સુરેખામાં ગતિ કરે છે. આ ભૌમિતિક પ્રકાશશાસ્ત્રનું ક્ષેત્ર છે, કે જેની આપણે ગત પ્રકરણમાં ચર્ચા કરી. હકીકતમાં, પ્રકાશશાસ્ત્રની એવી શાખા કે જેમાં તરંગલંબાઈના પરિમિતિપણાને સંપૂર્ણપણે અવગણવામાં આવે તેને ભૌમિતિક પ્રકાશશાસ્ત્ર કહે છે અને કિરણને તરંગલંબાઈના શૂન્ય લક્ષના કિસ્સા માટે ઊર્જા પ્રસરણના પથ તરીકે વ્યાખ્યાયિત કરાય છે.

1801ના યંગના વ્યતિકરણના પ્રયોગ પછીના લગભગ 40 વર્ષો સુધી, પ્રકાશ તરંગોના વ્યતિકરણ અને વિવર્તનને સાંકળતા ઘણા પ્રયોગો કરવામાં આવ્યા; આવા પ્રયોગો પ્રકાશના તરંગવાદને લઈને જ સંતોષકારક રીતે સમજાવી શકાયા હતા. આમ, ઓગણીસમી સદીના મધ્યભાગ સુધીમાં તરંગવાદ બહુ સારી રીતે સ્થાપિત થઈ ગયો હતો. એક માત્ર મુખ્ય મુશ્કેલી એ હતી કે જો તરંગને તેના પ્રસરણ માટે માધ્યમની જરૂર પડતી હોય તેમ માનીએ તો પ્રકાશ શૂન્યાવકાશમાં કેવી રીતે પ્રસરી શકે છે ? મેક્સવેલે પ્રકાશ માટે તેનો વિખ્યાત વિદ્યુતચુંબકીય વાદ રજૂ કર્યો ત્યારે આ બાબત સમજી શકાઈ હતી. મેક્સવેલે વિદ્યુતકીય અને ચુંબકના નિયમોને રજૂ કરતા સમીકરણોનું જૂથ (સમૂહ) આપ્યું અને આ સમીકરણોની મદદથી તેણે જે તરંગ સમીકરણ તરીકે ઓળખાય છે તે આપ્યું, કે જેની મદદથી વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોનું અસ્તિત્વનું પૂર્વાનુમાન કર્યું.* આ તરંગ સમીકરણ પરથી, મેક્સવેલે વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોની મુક્ત અવકાશમાં ઝડપ ગણી અને તેને જણાયું કે પ્રકાશની ઝડપનું સૈદ્ધાંતિક મૂલ્ય તેના પ્રાયોગિક મૂલ્યની ઘણી નજીક હતું. આ પરથી, તેણે એવી રજુઆત કરી કે પ્રકાશ વિદ્યુતચુંબકીય તરંગ જ છે. આમ, મેક્સવેલના મત મુજબ પ્રકાશતરંગો એ બદલાતા જતા વિદ્યુત અને ચુંબકીયક્ષેત્રો સાથે સંકળાયેલા છે; બદલાતું જતું વિદ્યુતક્ષેત્ર સમય અને અવકાશીય ચલ સાથે બદલાતું ચુંબકીયક્ષેત્ર ઉત્પન્ન કરે છે અને બદલાતું જતું ચુંબકીયક્ષેત્ર સમય અને અવકાશીય યામ સાથે બદલાતું વિદ્યુતક્ષેત્ર ઉત્પન્ન કરે છે. આ બદલાતા વિદ્યુત અને ચુંબકીયક્ષેત્રોને પરિણામે વિદ્યુતચુંબકીય તરંગો (અથવા પ્રકાશ તરંગો) શૂન્યાવકાશમાંથી પણ પ્રસરણ પામે છે.

આ પ્રકરણમાં આપણે પ્રથમ હાઈગેન્સના સિદ્ધાંતની મૂળ રચના (Formulation)ની ચર્ચા કરીશું અને પરાવર્તન અને વક્રીભવનાંકના નિયમો તારવીશું. પરિચ્છેદ 10.4 અને 10.5માં, આપણે વ્યતિકરણ કે જે સંપાતીકરણના સિદ્ધાંત પર આધારિત છે તેની ચર્ચા કરીશું. પરિચ્છેદ 10.6માં આપણે વિવર્તન ઘટનાની ચર્ચા કરીશું કે જે હાઈગેન્સ-ફ્રેનલ સિદ્ધાંત પર આધારિત છે. છેલ્લે પરિચ્છેદ 10.7માં આપણે ધ્રુવીભવનની ઘટનાની ચર્ચા કરીશું કે જે પ્રકાશ તરંગો લંબગત વિદ્યુતચુંબકીય તરંગો છે એ હકીકત ઉપર આધારિત છે.

* મેક્સવેલે લગભગ 1855માં વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોનાં અસ્તિત્વનું પૂર્વ અનુમાન કર્યું હતું; પરંતુ ખૂબ જ સમય બાદ (1890ની આસપાસ) હેન્રીચ હર્ટ્ઝે લેબોરેટરીમાં રેડિયો તરંગો ઉત્પન્ન કર્યા. જી.સી. બોઝ અને જી. માર્કોનીએ હર્ટ્ઝીયન તરંગોનો વ્યવહારુ ઉપયોગ કર્યો.

શું પ્રકાશ સુરેખામાં ગતિ કરે છે ?

ધોરણ VIમાં પ્રકાશ સુરેખામાં ગતિ કરે છે; પણ તે બારમા ધોરણમાં અને ત્યાર પછી તેમ કરતો નથી ! તમે શું અચંબિત થઈ ગયા ?

શાળામાં તમને એક પ્રયોગ બતાવવામાં આવે છે કે જેમાં સૂક્ષ્મ છિદ્રો (Pinholes) હોય તેવા ત્રણ કાર્ડબોર્ડ તમે લો છો, એક બાજુ મીણબત્તી રાખી તેને બીજી બાજુથી જુઓ છો. જો મીણબત્તીની જ્યોત અને ત્રણેય છિદ્રો એક જ રેખા પર હોય તો તમે મીણબત્તી જોઈ શકો છો. જો તેમાંના એકાદને પણ સહેજ ખસેડવામાં આવે તો તમે મીણબત્તી જોઈ શકતા નથી. તેથી તમારા શિક્ષક કહે છે કે આ સાબિત કરે છે કે પ્રકાશ સુરેખામાં ગતિ કરે છે.

આ પુસ્તકમાં, બે ક્રમિક પ્રકરણો છે, એક કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર પર અને બીજું તરંગ પ્રકાશશાસ્ત્ર પર. કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર પ્રકાશના સુરેખ પ્રસરણ પર આધારીત છે અને તે અરીસા, લેન્સ, પરાવર્તન, વક્રીભવન વગેરે જેવા મુદ્દાઓ સાથે સંકળાયેલ છે. ત્યાર પછીનું પ્રકરણ તરંગ પ્રકાશશાસ્ત્રનું છે, અને તમને ઉપર કહેવામાં આવ્યું છે કે પ્રકાશ તરંગની જેમ ગતિ કરે છે એટલેકે, તે પદાર્થ (અડચણ) આગળથી વાંકુ વળી શકે છે, તે વિવર્તન અને વ્યતિકરણ અનુભવે છે, વગેરે.

દૃશ્ય વિભાગમાં, પ્રકાશની તરંગલંબાઈ લગભગ અડધા માઈક્રોમીટરના જેટલી હોય છે. તે જો લગભગ આ જ પરિમાણ ધરાવતી અડચણ જોડે અથડાય તો તે તેની પાસેથી વાંકુ વળે છે અને તેને બીજી બાજુથી જોઈ શકાય છે. આમ, માઈક્રોમીટરના માપની અડચણ પ્રકાશ કિરણને રોકી શકતી નથી. જો અડચણ ખૂબ જ મોટા કદની હોય તો પ્રકાશ આટલા મોટા પ્રમાણમાં વળી શકતો નથી, અને તેને બીજી બાજુથી જોઈ શકાશે નહીં.

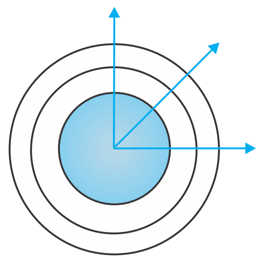
આ કોઈ પણ તરંગનો વ્યાપક ગુણધર્મ છે, અને તે ધ્વનિ તરંગો માટે પણ જોઈ શકાય છે. આપણી વાણીના તરંગની તરંગલંબાઈ લગભગ 50 cm થી 1 m સુધીની હોય છે, હવે તે જો અમુક મીટરના માપના અડચણ સાથે અથડાય તો તેને ફરતે વાંકુ વળે છે અને અડચણની પાછળના બિંદુઓએ આગળ પહોંચે છે. પરંતુ તે જો તેના પથમાં મોટા, લગભગ અમુક સો મીટરના, અડચણ, જેમકે ખડકો (Hilock) સાથે અથડાય તો ? તો તેમાંના મોટાભાગનું પરાવર્તન થાય છે અને તે પડઘા તરીકે સંભળાય છે.

તો પછી પ્રાથમિક શાળામાં ભણેલા પ્રયોગનું શું ? આપણે જ્યારે કાર્ડબોર્ડને ખસેડીએ છીએ ત્યારે સ્થાનાંતર અમુક મિલિમીટરના ક્રમનું હોય છે, જે પ્રકાશની તરંગલંબાઈ કરતાં ઘણું મોટું છે અને તેથી મીણબત્તી જોઈ શકાતી નથી. આપણે જો એકાદ કાર્ડબોર્ડને માઈક્રોમીટર કે તેનાથી ઓછું ખસેડી શકીએ તો પ્રકાશનું વિવર્તન થશે અને મીણબત્તી હજી પણ જોઈ શકાશે.

આપણે આ બૉક્સમાંના પ્રથમ વાક્યમાં ઉમેરી શકીએ કે "તે જેમ મોટું થતું જાય છે તેમ વળતાં શીખે છે !"

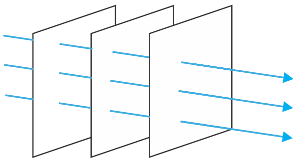
10.2 હાઈગેન્સનો સિદ્ધાંત (HUYGENS PRINCIPLE)

પહેલાં આપણે તરંગઅગ્ર વ્યાખ્યાયિત કરીએ : જ્યારે આપણે શાંત જલાગારમાં એક નાના પથ્થરને પડતો મૂકીએ છીએ ત્યારે પથ્થર પડવાના બિંદુ આગળથી તરંગો બહાર તરફ પ્રસરે છે. સપાટી પરનું દરેક બિંદુ સમય સાથે દોલનો કરવાનું શરૂ કરે છે. કોઈ પણ સમયે, સપાટીનો ફોટોગ્રાફ જેના પર વિક્ષોભ મહત્તમ હોય તેવા વર્તુળાકાર વલયો દર્શાવે છે. સ્પષ્ટ છે કે આવા વર્તુળાકાર પરના બધા જ બિંદુઓ ઉદ્‌ગમથી સરખા અંતરે હોવાને કારણે (સમાન) કળામાં દોલન કરતાં હશે. આવાં, કે જેઓ સમાન કળામાં દોલન કરતા બિંદુઓના સ્થાન (Locus)ને તરંગઅગ્ર કહે છે. આમ, તરંગઅગ્રને અચળ કળા ધરાવતા પૃષ્ઠ/સપાટી તરીકે વ્યાખ્યાયિત કરી શકાય. તરંગઅગ્ર જે ઝડપથી ઉદ્‌ગમથી બહાર તરફ ગતિ કરે છે તેને તરંગની ઝડપ કહે છે. તરંગની ઊર્જા તરંગઅગ્રને લંબદિશામાં ગતિ કરે છે.



આકૃતિ 10.1 (a) કોઈ બિંદુવત્ ઉદ્‌ગમમાંથી બહાર ફેલાતા (diverging) તરંગઅગ્રો ગોળાકાર છે.

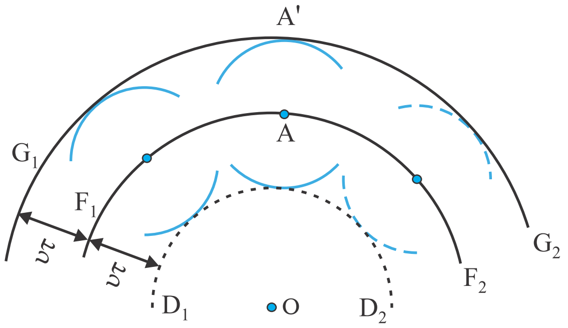
જો આપણી પાસે બધી જ દિશામાં સમાન રીતે તરંગો ઉત્સર્જિત કરતું બિંદુવત્ત ઉદ્‌ગમ હોય તો, સમાન કંપવિસ્તાર સાથે અને સમાન કળામાં દોલન કરતા બિંદુઓના સ્થાન ગોળાઓ પર હશે અને તેને આકૃતિ 10.1(a)માં દર્શાવ્યા મુજબ આપણને ગોળાકાર તરંગો મળે છે. ઉદ્‌ગમથી ઘણાં મોટા



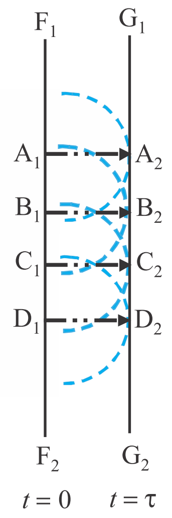
આકૃતિ 10.1 (b) ઉદ્‌ગમથી ખૂબ મોટા અંતરે, ગોળાકાર તરંગના નાના ભાગને સમતલ તરંગ તરીકે લઈ શકાય.

અંતરે આ ગોળાનાં નાના ભાગને સમતલ ગણી શકાય અને જેને આપણે સમતલ તરંગ [આકૃતિ 10.1(b)] કહીએ તે મળે છે.

હવે જો આપણે $t = 0$ સમયે તરંગઅગ્રનો આકાર જાણતા હોઈએ તો હાઈગેન્સનો સિદ્ધાંત આપણને પછીના τ સમયે તરંગઅગ્રનો આકાર આપે છે. આમ, મૂળભૂત રીતે હાઈગેન્સનો સિદ્ધાંત એક ભૌમિતિક રચના છે, કે જેની મદદથી આપેલ સમયે તરંગઅગ્રનો આકાર ખબર હોય તો પછીના કોઈ પણ સમયે તરંગઅગ્રનો આકાર જાણી શકાય છે. એક બહાર ફેલાતા (Diverging) તરંગને ધ્યાનમાં લો અને ધારો કે F_1F_2 એ $t = 0$ સમયે ગોળાકાર તરંગઅગ્રનો ભાગ દર્શાવે છે. (આકૃતિ 10.2). હવે, હાઈગેન્સના સિદ્ધાંત મુજબ, તરંગઅગ્ર પરનું દરેક બિંદુ ગૌણ વિક્ષોભના ઉદ્‌ગમ તરીકે વર્તે છે અને આ બિંદુઓમાંથી ઉત્સર્જિત નાના નાના (લઘુ) તરંગો (Wavelets) બધી જ દિશામાં તરંગની ઝડપથી સમાન રીતે પ્રસરે છે. તરંગઅગ્રમાંથી ઉત્સર્જિત આવા લઘુ તરંગો (Wavelets)ને ગૌણ તરંગો (Secondary Wavelets) તરીકે ઓળખવામાં આવે છે અને જો આ બધા જ ગોળાઓને એક સામાન્ય સ્પર્શક દોરવામાં આવે તો આપણને પછીના સમયે તરંગઅગ્રનું નવું સ્થાન મળે છે.



આકૃતિ 10.2 F_1F_2 એ (O કેન્દ્ર હોય તેવું) $t = 0$ સમયે ગોળાકાર તરંગઅગ્ર દર્શાવે છે. F_1F_2માંથી ઉત્સર્જિત ગૌણ લઘુ તરંગો (Wavelets)ને સમાવતું પૃષ્ઠ આગળ વધતા G_1G_2 તરંગઅગ્રને ઉત્પન્ન કરે છે. પાછળની દિશામાં D_1D_2 તરંગ અસ્તિત્વ ધરાવતું નથી.



આકૃતિ 10.3 જમણીબાજુ પ્રસરતા સમતલ તરંગઅગ્ર માટે હાઈગેન્સની ભૌમિતિક રચના F_1F_2 એ $t = 0$ સમયે સમતલ તરંગ અગ્ર અને G_1G_2 એ ત્યારબાદના $t = \tau$ સમયે તરંગઅગ્ર છે. રેખાઓ A_1A_2, B_1B_2, ..., વગેરે એ F_1F_2 અને G_1G_2 એમ બંનેને લંબ છે અને તે કિરણો રજૂ કરે છે.

આમ, જો આપણે $t = \tau$ સમયે તરંગઅગ્રનો આકાર નક્કી કરવો હોય તો ગોળાકાર તરંગઅગ્રના દરેક બિંદુએથી $v\tau$ જેટલી ત્રિજ્યા ધરાવતા ગોળાઓ દોરીશું. અહીં, v એ માધ્યમમાં તરંગોની ઝડપ દર્શાવે છે. હવે જો આપણે આ બધા જ ગોળાઓને એક સમાન સ્પર્શક દોરીએ તો આપણને $t = \tau$ સમયે તરંગઅગ્રનું નવું સ્થાન મળે છે. આવું નવું તરંગઅગ્ર આકૃતિ 10.2માં G_1G_2 વડે દર્શાવેલ છે, તે પણ કેન્દ્ર O કેન્દ્રવાળો ગોળાકાર છે.

ઉપરોક્ત મૉડેલ (Model)ની એક મર્યાદા છે : આકૃતિ 10.2માં દર્શાવ્યા મુજબ આપણને પાછળની દિશામાં પણ એક તરંગ D_1D_2 મળે છે. હાઈગેન્સે એવો તર્ક આપ્યો કે આવા ગૌણ લઘુ તરંગો (Wavelets)નો આગળની દિશાનો કંપવિસ્તાર મહત્તમ જ્યારે પાછળની દિશામાં આ કંપવિસ્તાર શૂન્ય હોય છે; આવી અનૌપચારિક (Adhoc) પૂર્વધારણા પરથી, હાઈગેન્સ પાછળની દિશામાંના તરંગની ગેરહાજરી સમજાવી શક્યો. અલબત્ત આવી અનૌપચારિક (Adhoc) પૂર્વધારણા એ સંતોષકારક નથી અને પાછળની દિશામાં તરંગની ગેરહાજરી એ વધુ વિસ્તૃત તરંગવાદથી જ વાજબી ઠેરવાય છે.

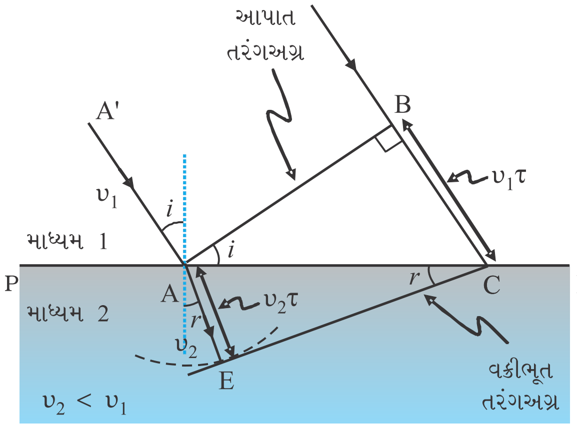
આ જ રીતે, આપણે હાઈગેન્સના સિદ્ધાંતની મદદથી માધ્યમમાં પ્રસરતા સમતલ તરંગ માટે પણ તરંગઅગ્રનો આકાર શોધી શકીએ છીએ (આકૃતિ 10.3).

10.3 હાઈગેન્સના સિદ્ધાંતની મદદથી સમતલ તરંગોનું વક્રીભવન અને પરાવર્તન (REFRACTION AND REFLECETION OF PLANE WAVES USING HUYGENS PRINCIPLE)

10.3.1 સમતલ તરંગનું વક્રીભવન (Refraction of a Plane Wave)

હવે આપણે હાઈગેન્સના સિદ્ધાંતનો ઉપયોગ કરીને વક્રીભવનના નિયમો તારવીશું. આકૃત્તિ 10.4માં દર્શાવ્યા અનુસાર, ધારો કે માધ્યમ-1 અને માધ્યમ-2ને છૂટી પાડતી સપાટી PP' વડે દર્શાવેલ છે. ધારોકે માધ્યમ-1 અને માધ્યમ-2માં પ્રકાશની ઝડપ અનુક્રમે υ_1 અને υ_2 છે. આકૃતિમાં દર્શાવ્યા અનુસાર, ધારોકે A'A દિશામાં પ્રસરતું એક સમતલ તરંગઅગ્ર AB એ બે માધ્યમોની આંતરસપાટી પર i જેટલા કોણે આપાત થાય છે. ધારોકે તરંગઅગ્રને BC જેટલું અંતર કાપતા લાગતો સમય τ છે. આમ,

$$BC = \upsilon_1 \tau$$



આકૃતિ 10.4 માધ્યમ-1 અને માધ્યમ-2ને છૂટી પાડતી સપાટી PP' ઉપર એક સમતલ તરંગઅગ્ર AB, i જેટલા કોણે આપાત થાય છે. આ સમતલ તરંગ વક્રીભવન અનુભવે છે અને CE વક્રીભૂત તરંગઅગ્ર દર્શાવે છે. આકૃતિ $\upsilon_2 < \upsilon_1$ ને અનુરૂપ છે કે જેથી વક્રીભૂત તરંગો લંબ તરફ વાંકા વળે છે.

ક્રિશ્ચિયન હાઈગેન્સ (Christiaan Huygen) (1629-1695)

ક્રિશ્ચિયન હાઈગેન્સ (Christiaan Huygens) (1629-1695) ડચ્ ભૌતિક-વિજ્ઞાની, ગણિતજ્ઞ અને પ્રકાશના તરંગવાદના પ્રણેતા/સ્થાપક તેમનું પુસ્તક 'Treatise on Light' આજે પણ ખૂબ જ વંચાય છે. તેણે ખૂબ જ હોશિયારીપૂર્વક પરાવર્તન અને વક્રીભવન ઉપરાંત કેલ્સાઈટ ખનીજમાં દ્વિ-વક્રીભવનની ઘટના સમજાવી હતી. તેઓ પ્રથમ (વિજ્ઞાની) હતા કે જેમણે વર્તુળાકાર અને સરળ આવર્તગતિનું વિશ્લેષણ કર્યું અને સુધારેલી ઘડીયાળો અને ટેલીસ્કોપની રચના કરી. તેઓએ શનિના વલયોની સાચી ભૂમિતિ શોધી હતી.

વક્રીભૂત તરંગઅગ્રનો આકાર નક્કી કરવા માટે, આપણે બીજા માધ્યમમાં બિંદુ A માંથી $\upsilon_2\tau$ જેટલી ત્રિજ્યા ધરાવતો ગોળો દોરીશું (બીજા માધ્યમમાં તરંગની ઝડપ υ_2 છે). ધારોકે CE એ ગોળાકાર બિંદુ C આગળ દોરેલું સ્પર્શીય સમતલ દર્શાવે છે. તો, $AE = \upsilon_2\tau$ અને CE એ વક્રીભૂત તરંગઅગ્ર થશે. હવે જો આપણે ત્રિકોણ ABC અને AEC વિચારીએ તો આપણને

$$\sin i = \frac{BC}{AC} = \frac{\upsilon_1\tau}{AC} \qquad (10.1)$$

અને

$$\sin r = \frac{AE}{AC} = \frac{\upsilon_2\tau}{AC} \qquad (10.2)$$

મળે.

જ્યાં, i અને r એ અનુક્રમે આપાત અને વક્રીભૂત કોણ છે.

આમ, આપણને

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} \tag{10.3}$$

મળે.

ઉપરના સમીકરણ પરથી, આપણને એક અગત્યનું પરિણામ મળે છે કે જો $r < i$ (એટલે કે, જો પ્રકાશકિરણ લંબ તરફ વાંકુ વળે) તો પ્રકાશ તરંગની બીજા માધ્યમમાં ઝડપ (υ_2) એ પ્રથમ માધ્યમમાં ઝડપ (υ_1) કરતા ઓછી હશે. આ અનુમાન કણવાદના અનુમાન કરતાં વિરુદ્ધ છે અને (ખરેખર) ત્યાર પછીના પ્રયોગોએ દર્શાવ્યું કે, તરંગવાદ દ્વારા મળેલ પૂર્વાનુમાન સાચું છે. હવે જો શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ c હોય તો

$$n_1 = \frac{c}{\upsilon_1} \tag{10.4}$$

અને

$$n_2 = \frac{c}{\upsilon_2} \tag{10.5}$$

ને અનુક્રમે માધ્યમ-1 અને માધ્યમ-2ના વક્રીભવનાંક કહે છે. વક્રીભવનાંકોનાં પદમાં, સમીકરણ (10.3)ને નીચે મુજબ લખી શકાય.

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \tag{10.6}$$

આ વક્રીભવન માટેનો સ્નેલનો નિયમ છે. વધારામાં, જો λ_1 અને λ_2 એ અનુક્રમે માધ્યમ-1 અને માધ્યમ-2માં તરંગલંબાઈઓ હોય અને જો અંતર BC એ λ_1 જેટલું હોય તો અંતર AE એ λ_2 જેટલું થશે (કારણકે જો Bમાંથી ઉત્પન્ન શૃંગ τ જેટલા સમયમાં C આગળ પહોંચે તો A આગળથી ઉત્પન્ન શૃંગ પણ τ જેટલા સમયમાં E આગળ પહોંચવુ જોઈએ); આમ,

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{BC}{AE} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$$

અથવા

$$\frac{\upsilon_1}{\lambda_1} = \frac{\upsilon_2}{\lambda_2} \tag{10.7}$$

ઉપરનું સમીકરણ સૂચવે છે કે જ્યારે તરંગ ઘટ્ટ માધ્યમ ($\upsilon_1 > \upsilon_2$)માં વક્રીભૂત થાય છે ત્યારે તરંગલંબાઈ અને પ્રસરણની ઝડપ ઘટે છે, પરંતુ આવૃત્તિ ν ($= \upsilon/\lambda$) અચળ રહે છે.

10.3.2 પાતળા માધ્યમ આગળ વક્રીભવન (Refraction at a Rarer Medium)

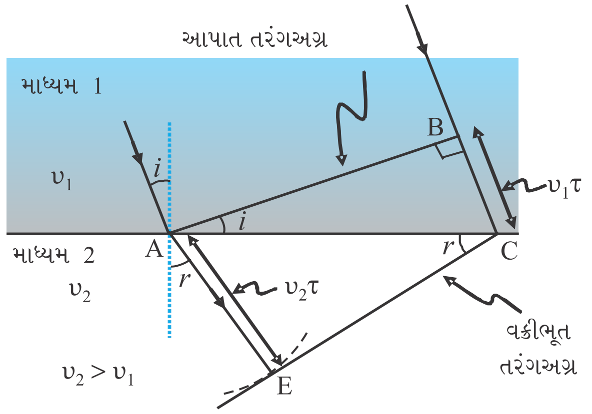
હવે આપણે એક સમતલ તરંગનું પાતળા માધ્યમમાં થતું વક્રીભવન વિચારીએ, એટલેકે $\upsilon_2 > \upsilon_1$ ઉપરની જેમજ, આકૃતિ 10.5માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે, આપણે આગળ વધતાં વક્રીભૂત તરંગઅગ્ર રચી શકીએ. હવે, વક્રીભૂતકોણ એ આપાતકોણ કરતા વધારે હશે; પરંતુ હજુ પણ $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ નિયમ પળાશે. આપણે કોણ i_cને નીચેના સમીકરણથી વ્યાખ્યાયીત કરીએ.

$$\sin i_c = \frac{n_2}{n_1} \tag{10.8}$$

આમ, જો $i = i_c$ તો $\sin r = 1$ અને $r = 90^\circ$ થાય. સ્વાભાવિક છે કે $i > i_c$ માટે કોઈ પણ વક્રીભૂત તરંગ મળશે નહીં. કોણ i_cને ક્રાંતિકોણ (Critical Angle) કહે છે અને ક્રાંતિકોણથી મોટા બધા જ આપાતકોણો માટે આપણને કોઈ વક્રીભૂત કિરણ મળશે નહીં અને તરંગ પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનથી ઓળખાતી ઘટના અનુભવશે. પૂર્ણ આંતરિક પરાવર્તનની ઘટના અને તેના ઉપયોગો પરિચ્છેદ 9.4માં ચર્ચા કરેલ છે.

Demonstration of interference, diffraction, refraction, resonance and Doppler effect
http://www.falstad.com/ripple

PHYSICS



આકૃતિ 10.5 પાતળા માધ્યમ કે જેના માટે $\upsilon_2 > \upsilon_1$ છે તેના પર આપાત સમતલનું વક્રીભવન સમતલ તરંગ લંબથી દૂર વાંકુ વળે છે.

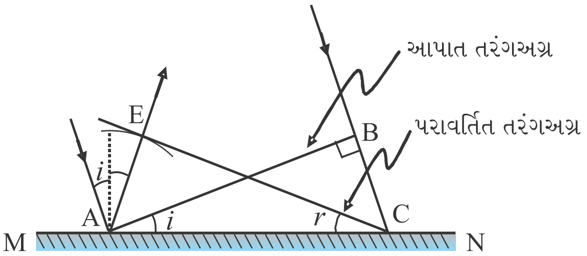
10.3.3 સમતલ સપાટી પરથી સમતલ તરંગનું પરાવર્તન (Reflection of a Plane Wave by a Plane Surface)

હવે પછી આપણે એક પરાવર્તક સપાટી MN પર i કોણે આપાત થતા સમતલ તરંગ ABને ધ્યાનમાં લઈએ. જો υ એ તરંગની માધ્યમમાં ઝડપ અને τ એ તરંગઅગ્રને બિંદુ Bથી C સુધી આગળ ખસવા માટે લાગતો સમય દર્શાવે તો અંતર

$BC = \upsilon\tau$ થશે.

પરાવર્તિત તરંગઅગ્ર રચવા માટે આપણે આકૃતિ 10.6માં દર્શાવ્યા અનુસાર બિંદુ A માંથી $\upsilon\tau$ ત્રિજ્યાનો ગોળો દોરીએ. ધારોકે બિંદુ C માંથી આ ગોળાને દોરેલ સ્પર્શીય સમતલ CE વડે દર્શાવેલ છે. સ્વાભાવિક રીતે જ

$AE = BC = \upsilon\tau$

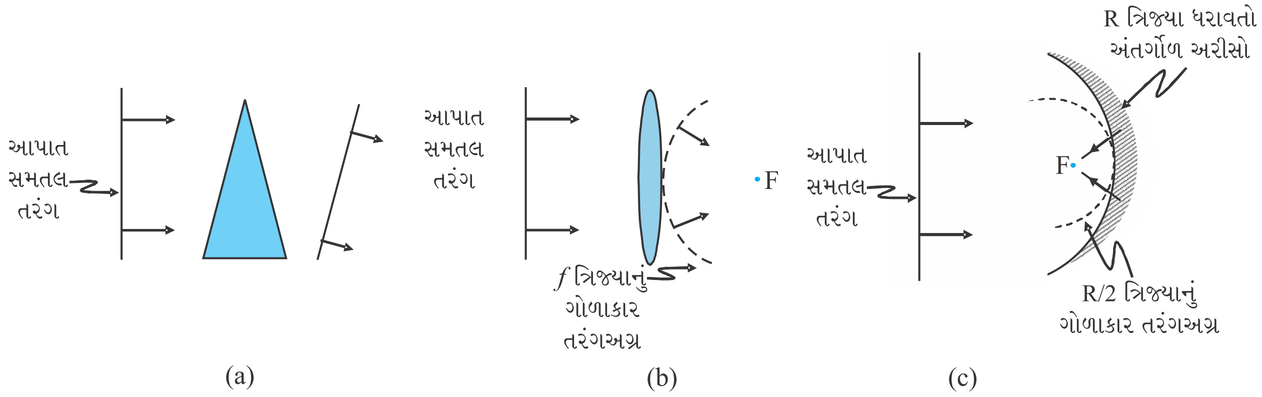


આકૃતિ 10.6 પરાવર્તક સપાટી MN પરથી પરાવર્તન પામતું સમતલ તરંગ AB. AB અને CE એ આપાત અને પરાવર્તિત તરંગઅગ્રો દર્શાવે છે.

હવે, જો આપણે ત્રિકોણો EAC અને BAC વિચારીએ તો આપણે જોઈ શકીએ છીએ કે તે એકરૂપ છે અને તેથી ખૂણાઓ i અને r (આકૃતિ 10.6માં દર્શાવ્યા મુજબ) સમાન થશે. *આ પરાવર્તનનો નિયમ છે.*

એક વખત આપણી પાસે પરાવર્તન અને વક્રીભવનના નિયમો હોય તો પ્રિઝમ, લેન્સ અને અરીસાઓની વર્તણુક સમજી શકાય છે. આ ઘટનાઓ આપણે પ્રકરણ-9માં પ્રકાશના સુરેખ પ્રસરણને આધારે વિસ્તારપૂર્વક ચર્ચી હતી. અહીં, આપણે ફક્ત તરંગઅગ્રોની વર્તણૂક જ્યારે તેઓ

પરાવર્તન કે વક્રીભવન અનુભવે તે દર્શાવીએ છીએ. આકૃતિ 10.7(a)માં આપણે એક પાતળા પ્રિઝમમાંથી પસાર થતા સમતલ તરંગને ધ્યાનમાં લઈએ છીએ. એ સ્પષ્ટ જ છે કે કાચમાં પ્રકાશતરંગોની ઝડપ ઓછી હોવાને કારણે આપાત તરંગઅગ્રનો નીચેનો ભાગ (કે જે પ્રિઝમના કાચના સૌથી જાડા ભાગમાંથી પસાર થાય છે) થોડોક મોડો પડશે અને પરિણામે આકૃતિમાં દર્શાવ્યા મુજબ પારગમન પામતું તરંગઅગ્ર થોડુંક નમેલું (Tilted) છે. આકૃતિ 10.7(b)માં, આપણે એક પાતળા બહિર્ગોળ લેન્સ ઉપર સમતલ તરંગ આપાત થતું વિચારેલ છે; આપાત સમતલ તરંગનો મધ્યભાગ લેન્સના સૌથી જાડા ભાગમાંથી પસાર થાય છે અને તે સૌથી મોડો પડે છે. નિર્ગમન પામતું તરંગઅગ્ર કેન્દ્ર આગળ નમેલું હોવાથી, તરંગઅગ્ર ગોળાકાર હશે અને તે બિંદુ F આગળ કેન્દ્રિત થશે. Fને *કેન્દ્ર* (*Focus*)કહે છે. આકૃતિ 10.7(c)માં એક સમતલ તરંગ અંતર્ગોળ અરીસા ઉપર આપાત થાય છે અને તે પરાવર્તન પામતાં આપણને ગોળાકાર તરંગ કેન્દ્રબિંદુ (Focal Point) F આગળ કેન્દ્રિત થતું જોવા મળે છે. આ જ રીતે, આપણે અંતર્ગોળ લેન્સ અને બહિર્ગોળ અરીસા માટે વક્રીભવન અને પરાવર્તન સમજી શકીએ.



આકૃતિ 10.7 (a) પાતળા પ્રિઝમથી (b) બહિર્ગોળ લેન્સથી એક સમતલ તરંગનું વક્રીભવન.
(c) અંતર્ગોળ અરીસાથી સમતલ તરંગનું પરાવર્તન.

ઉપરની ચર્ચા પરથી કહી શકાય કે વસ્તુ પરના કોઈ બિંદુ પરથી પ્રતિબિંબના આનુષંગિક બિંદુએ કિરણને પહોંચતાં લાગતો સમય કોઈ પણ કિરણ માટે માપતાં એકસમાન છે. ઉદાહરણ તરીકે, જ્યારે બહિર્ગોળ લેન્સ પ્રકાશને કેન્દ્રિત કરી વાસ્તવિક પ્રતિબિંબ રચે છે ત્યારે ભલેને મધ્યભાગમાંથી પસાર થતું કિરણ સૌથી નાના પથ પર ગતિ કરે છે, પરંતુ (કાચમાં) તેની ઝડપ ઓછી હોવાને કારણે લીધેલો સમય લેન્સના છેડા આગળ ગતિ કરતા કિરણો જેટલો જ છે.

10.3.4 ડૉપ્લર અસર (The Doppler Effect)

અત્રે એ નોંધવું જરૂરી છે કે જ્યારે ઉદ્‌ગમ (કે નિરીક્ષક) ગતિમાં હોય તે સ્થિતિમાં તરંગઅગ્રની રચના ધ્યાનપૂર્વક કરવી પડશે. ઉદાહરણ તરીકે, જ્યારે માધ્યમની ગેરહાજરી હોય અને ઉદ્‌ગમ અવલોકનકારથી દૂર જતો હોય ત્યારે ક્રમશઃ (મોડા) આવતા તરંગઅગ્રોને અવલોકનકાર સુધી પહોંચવા માટે વધારે અંતર કાપવું પડે છે અને તેથી તે સમય પણ વધારે લે છે. આમ, અવલોકનકાર સુધી પહોંચતા બે ક્રમિક તરંગઅગ્રો વચ્ચેનો સમયગાળો ઉદ્‌ગમની આગળ જ (તદ્દન નજીક) લાગતા સમયગાળા કરતા વધારે હશે. આમ, જ્યારે ઉદ્‌ગમ અવલોકનકારથી દૂર જતું હોય છે ત્યારે મપાયેલ આવૃત્તિ નાની હશે. આ ઘટનાને ડૉપ્લર અસર કહે છે. ખગોળવિજ્ઞાનીઓ *ડૉપ્લર અસર*ને કારણે તરંગલંબાઈના વધારાને, વર્ણપટના મધ્ય ભાગમાંની તરંગલંબાઈ, વર્ણપટના રાતા (Red) રંગ તરફ ખસતી હોવાને કારણે, રેડ શિફ્ટ (*Red Shift*) તરીકે ઓળખે છે. જ્યારે અવલોકનકાર તરફ ગતિ કરતા ઉદ્‌ગમમાંથી ઉત્સર્જિત તરંગો પ્રાપ્ત (Receive) કરવામાં આવે છે ત્યારે તરંગલંબાઈમાં દેખીતો ઘટાડો થાય છે, આને બ્લ્યુ શિફ્ટ (*Blue Shift*) કહે છે.

તમે ધોરણ XIના પાઠ્યપુસ્તકના પ્રકરણ-15માં ધ્વનિ તરંગોમાં ડૉપ્લર અસરનો અભ્યાસ કરી જ ચૂક્યા છો. પ્રકાશની ઝડપની સરખામણીએ નાના વેગ માટે, આપણે જે સૂત્રો ધ્વનિ તરંગો માટે વાપરેલા હતા તે જ સૂત્રોનો ઉપયોગ કરી શકીએ. આવૃત્તિમાં આંશિક (Fractional) ફેરફાર $\Delta\nu/\nu$ ને $-\upsilon_{\text{ત્રિજ્યાવર્તી}}/c$ વડે આપવામાં આવે છે કે જ્યાં, $\upsilon_{\text{ત્રિજ્યાવર્તી}}$ એ ઉદ્ગમના વેગનો, અવલોકનકારની સાપેક્ષે, અવલોકનકાર અને ઉદ્ગમને જોડતી રેખાની દિશામાંનો ઘટક છે; જ્યારે ઉદ્ગમ અવલોકનકારથી દૂર ખસતો હોય ત્યારે $\upsilon_{\text{ત્રિજ્યાવર્તી}}$ ને ધન ગણવામાં આવે છે. આમ, ડૉપ્લર-શિફ્ટને નીચે મુજબ દર્શાવી શકાય :

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{-\upsilon_{\text{ત્રિજ્યાવર્તી}}}{c} \tag{10.9}$$

ઉપર દર્શાવેલ સૂત્ર ફક્ત એવા જ કિસ્સામાં સત્ય છે કે જ્યારે ઉદ્ગમની ઝડપ પ્રકાશની સરખામણીએ ઓછી હોય. ડૉપ્લર અસર માટે પ્રકાશના ઝડપની નજીકનું મૂલ્ય ધરાવતી હોય તે ઝડપો માટે વધારે ચોક્કસાઈ ધરાવતું સૂત્ર મેળવવા માટે આઈન્સ્ટાઈનના વિશિષ્ટ સાપેક્ષતાવાદની જરૂર પડશે. ખગોળવિજ્ઞાનમાં પ્રકાશની ડૉપ્લર અસર ખૂબ અગત્યની છે. તે દૂરની આકાશગંગાઓ (Galaxies)ના ત્રિજ્યાવર્તી વેગ માપવા માટેનો પાયો છે.

ઉદાહરણ 10.1 આપણી સાપેક્ષે આકાશગંગાએ કેટલી ઝડપથી ગતિ કરવી જોઈએ કે જેથી 589.0 nmની સોડીયમ રેખા 589.6 nm આગળ દેખાય ?

ઉકેલ જેમ $\nu\lambda = c$, હોવાથી, $\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ = (ν અને λના નાના ફેરફાર માટે)

તેથી, $\Delta\lambda = 589.6 - 589.0 = +0.6$ nm

(સમીકરણ (10.9)નો ઉપયોગ કરતાં) આપણને

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{-\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{-\upsilon_{\text{ત્રિજ્યાવર્તી}}}{c}$$ મળે છે.

અથવા $\upsilon_{\text{ત્રિજ્યાવર્તી}} \cong c\left(\frac{0.6}{589.0}\right) = +3.06 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$

$= 306$ km/s

તેથી, આકાશગંગા આપણાથી દૂર જાય છે.

ઉદાહરણ 10.1

ઉદાહરણ 10.2

(a) જ્યારે એકરંગી પ્રકાશ એ બે માધ્યમોને છૂટી પાડતી સપાટી પર આપાત થાય છે, ત્યારે પરાવર્તિત અને વક્રીભૂત બંને પ્રકાશની આવૃત્તિ આપાત આવૃત્તિ જેટલી સમાન આવૃત્તિ હોય છે. સમજાવો શા માટે ?

(b) પ્રકાશ જ્યારે પાતળાથી ઘટ્ટ માધ્યમમાં ગતિ કરે છે, ત્યારે ઝડપ ઘટે છે. શું ઝડપનો ઘટાડો પ્રકાશ તરંગ દ્વારા લઈ જવાતી ઊર્જામાં ઘટાડો સૂચવે છે ?

(c) પ્રકાશનાં તરંગ સ્વરૂપમાં, પ્રકાશની તીવ્રતા તરંગના કંપવિસ્તારના વર્ગ પરથી નક્કી કરવામાં આવે છે. પ્રકાશના ફોટોન સ્વરૂપમાં તીવ્રતા શાનાથી નક્કી થાય છે ?

ઉકેલ

(a) પરાવર્તન અને વક્રીભવનની ઘટના આપાત પ્રકાશની પદાર્થના પરમાણ્વિક ઘટકો સાથેની આંતરક્રિયાને કારણે ઉદ્ભવે છે. પરમાણુઓને આપણે દોલકો તરીકે વિચારી

ઉદાહરણ 10.2

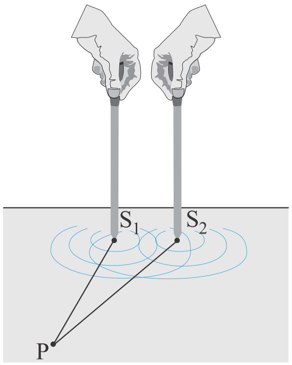
ઉદાહરણ 10.2

શકીએ કે જે બાહ્ય સ્રોત (પ્રકાશ)ની આવૃત્તિ મેળવે છે અને પ્રણોદીત દોલનો કરે છે. આવા વિદ્યુતભારિત દોલકો દ્વારા ઉત્સર્જાતી આવૃત્તિ અને તેમના દોલનોની આવૃત્તિ સમાન હોય છે. આમ, પ્રકેરિત પ્રકાશની આવૃત્તિ એ આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ જેટલી જ હોય છે.

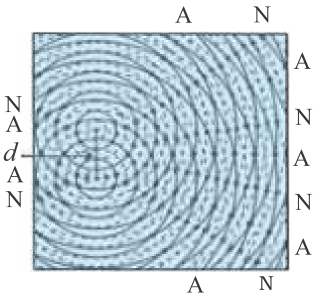
(b) ના. તરંગ દ્વારા ઉત્સર્જિત ઊર્જા તરંગના કંપવિસ્તાર પર આધાર રાખે છે, નહીં કે તરંગ પ્રસરણની ઝડપ ઉપર.

(*c*) આપેલ આવૃત્તિ માટે, ફોટોન પરિકલ્પનામાં પ્રકાશની તીવ્રતા એ એકમ સમયમાં એકમ આડછેદમાંથી પસાર થતા ફોટોનની સંખ્યા વડે નક્કી થાય છે.

10.4 તરંગોનો સુસમ્બધ્ધ અને અસુસમ્બધ્ધ સરવાળો (COHERENT AND INCOHERENT ADDITION OF WAVES)



(a)



(b)

આકૃતિ 10.8 (a) પાણીમાં એકબીજા સાથે કળામાં દોલન કરતી બે સોયો બે સુસમબધ્ધ ઉદ્‌ગમોને રજૂ કરે છે. (b) આપેલ ક્ષણે, પાણીની સપાટી ઉપર પાણીના અણુઓ દ્વારા રચાતી ભાત, N (સ્થાનાંતર ના હોય-પ્રસપંદ) અને A (મહત્તમ સ્થાનાંતર હોય-નિષ્પંદ) રેખાઓ રજૂ કરે છે.

આ પરિચ્છેદમાં આપણે બે તરંગોના સંપાતીકરણને કારણે ઉત્પન્ન થતી વ્યતિકરણ-ભાતની ચર્ચા કરીશું. તમને યાદ હશે કે ધોરણ XIના પાઠ્યપુસ્તકમાં પ્રકરણ-15માં આપણે *સંપાતીકરણના સિદ્ધાંત*ની ચર્ચા કરેલી હતી, ખરેખર તો વ્યતિકરણનું સમગ્ર ક્ષેત્ર સંપાતીકરણના સિદ્ધાંત મુજબ, *માધ્યમનાં કોઈ ચોક્કસ બિંદુ આગળ સંખ્યાબંધ તરંગોના સંપાતીકરણને કારણે પરિણામી સ્થાનાંતર એ દરેક તરંગ દ્વારા થતા સ્થાનાંતરનાં સદિશ સરવાળા બરાબર હોય છે, તે પર આધારિત છે.*

પાણી ભરેલાં (છીછરાં) પાત્ર [આકૃતિ 10.8(a)]માં બે સોય S_1 અને S_2 ઉપર-નીચેની દિશામાં સમાન રીતે પાણીની સપાટીને અડકે તેમ આવર્તગતિ કરે છે. તેઓ બે જલ તરંગો ઉત્પન્ન કરે છે, અને કોઈ ચોક્કસ બિંદુ આગળ, દરેક તરંગને કારણે ઉત્પન્ન થતા સ્થાનાંતરો વચ્ચેનો કળા તફાવત સમય સાથે બદલાતો નથી; જ્યારે આવું બને છે ત્યારે બંને ઉદ્‌ગમો સુસમ્બધ્ધ છે તેમ કહેવાય છે. [આકૃતિ 10.8(b)], આપેલ સમયે શૃંગનાં સ્થાનો (સળંગ વર્તુળો) અને ગર્તનાં સ્થાનો (ત્રૂટક વર્તુળો) દર્શાવેલ છે.

કોઈ બિંદુ P નો વિચાર કરો કે જેના માટે,

$S_1P = S_2P$ છે.

S_1P અને S_2P અંતરો સમાન હોવાથી, S_1 અને S_2થી બિંદુ P સુધી પહોંચતા તરંગોને લાગતો સમય સમાન હશે અને S_1 અને S_2માંથી સમાન કળામાં ઉત્પન્ન થતા તરંગો બિંદુ P આગળ પણ સમાન કળામાં જ પહોંચશે.

આમ, જો બિંદુ P આગળ S_1 ઉદ્‌ગમ દ્વારા ઉત્પન્ન સ્થાનાંતર.

$y_1 = a \cos \omega t$

વડે આપી શકાય તો (બિંદુ P આગળ) S_2 ઉદ્‌ગમ દ્વારા ઉત્પન્ન સ્થાનાંતર પણ નીચે મુજબ આપી શકાય.

$y_2 = a \cos \omega t$

આપી શકાય. આમ, P આગળ પરિણામી સ્થાનાંતર નીચે મુજબ અપાશે.

$y = y_1 + y_2 = 2\,a \cos \omega t$

અપાય છે. હવે, તીવ્રતા કંપવિસ્તારના વર્ગના સમપ્રમાણમાં હોવાથી પરિણામી તીવ્રતા

$I = 4\,I_0$ થશે,

જ્યાં, I_0 એ દરેક સ્વતંત્ર ઉદ્‌ગમ દ્વારા ઉત્સર્જિત તીવ્રતા છે; I_0 એ a^2ના સમપ્રમાણમાં છે. હકીકતમાં, S_1S_2 પરનાં લંબદ્વિભાજક પરનાં કોઈ પણ બિંદુ આગળ, તીવ્રતા $4\,I_0$ જ થશે. આ સંજોગોમાં બંને ઉદ્‌ગમો એકબીજા સાથે સહાયક રીતે વ્યતિકરણ અનુભવે છે તેમ કહેવાય અને તેને આપણે *સહાયક વ્યતિકરણ*થી ઓળખીશું. હવે પછી આપણે બિંદુ Qને ધ્યાનમાં લઈએ [આકૃતિ 10.9(a)] કે જેના માટે,

$S_2Q - S_1Q = 2\lambda$

S_1માંથી ઉત્પન્ન તરંગો S_2માંથી ઉત્પન્ન તરંગો કરતા બરાબર બે આવર્ત (ચક્ર, Cycles) વહેલાં પહોંચશે અને તેથી ફરીવાર એકબીજા સાથે કળામાં હશે [આકૃતિ 10.9(a)]. આમ, જો S_1ને કારણે ઉત્પન્ન સ્થાનાંતર નીચે મુજબ આપી શકીએ.

$y_1 = a \cos \omega t$

વડે અપાય, તો S_2 દ્વારા ઉત્પન્ન સ્થાનાંતર

$y_2 = a \cos(\omega t - 4\pi) = a \cos \omega t$

વડે અપાય છે જ્યાં, આપણે એ હકીકતનો ઉપયોગ કર્યો કે 2λ જેટલો પથ તફાવત એ 4π જેટલા કળા તફાવતને અનુરૂપ છે. આ બંને સ્થાનાંતરો ફરીવાર એકબીજાની સાથે કળામાં હશે અને તીવ્રતા ફરીવાર $4\ I_0$ થશે કે જે સહાયક વ્યતિકરણ આપે છે. ઉપરના વિશ્લેષણમાં આપણે એવું ધાર્યું કે S_1Q અને S_2Q અંતરો એ (S_1 અને S_2 વચ્ચેનાં અંતર) dની સરખામણીમાં ઘણાં મોટા છે કે જેથી, ભલે S_1Q અને S_2Q સમાન નથી પણ, દરેક ઉદ્‌ગમ દ્વારા ઉત્પન્ન સ્થાનાંતરનો કંપવિસ્તાર લગભગ સમાન છે.

હવે પછી બિંદુ Rને ધ્યાનમાં લો. [આકૃતિ 10.9(b)] કે જેના માટે

$S_2R - S_1R = -2.5\lambda$

ઉદ્‌ગમ S_1માંથી ઉત્પન્ન તરંગો, S_2માંથી ઉત્પન્ન તરંગો કરતાં બરાબર અઢી (2.5) આવર્ત (ચક્ર, Cycle) મોડા પહોંચે છે [આકૃતિ 10.10(b)]. આમ, જો S_1 દ્વારા ઉત્પન્ન સ્થાનાંતર નીચે મુજબ આપી શકાય.

$y_1 = a \cos \omega t$

વડે અપાય, તો S_2 દ્વારા ઉત્પન્ન સ્થાનાંતર.

$y_2 = a \cos(\omega t + 5\pi) = -a \cos \omega t$

વડે અપાય છે. જ્યાં, આપણે એ હકીકતનો ઉપયોગ કર્યો કે 2.5λ જેટલો પથ તફાવત એ 5π જેટલા કળાતફાવતને આનુષંગિક છે, આ બંને સ્થાનાંતરો એકબીજાથી વિરુદ્ધ કળામાં છે અને બંને સ્થાનાંતર એકબીજાની અસર નાબૂદ કરશે અને શૂન્ય તીવ્રતા આપશે. આને *વિનાશક વ્યતિકરણ* કહે છે.

ટૂંકમાં : જો આપણી પાસે બે સુસમ્બધ્ધ ઉદ્‌ગમો S_1 અને S_2 સમાન કળામાં દોલન કરતા હોય, તો કોઈ યાદચ્છિક બિંદુ P આગળ જ્યારે પણ પથ તફાવત

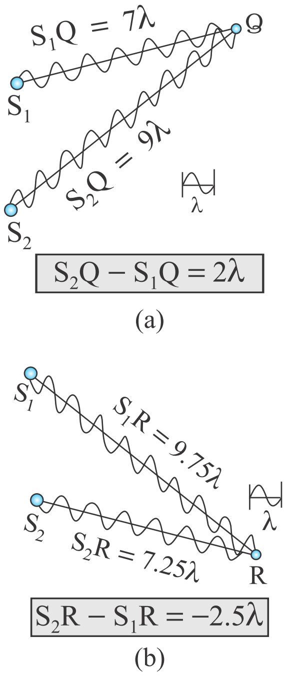
$$S_1P \sim S_2P = n\lambda \ (n = 0, 1, 2, 3, ...) \quad (10.10)$$

હોય ત્યારે આપણને સહાયક વ્યતિકરણ મળશે અને પરિણામી તીવ્રતા $4\ I_0$ થશે. S_1P અને S_2P વચ્ચેની ~ સંજ્ઞા S_1P અને S_2P વચ્ચેનો તફાવત સૂચવે છે. આનાથી વિપરીત, બિંદુ P એવું હોય કે પથ તફાવત

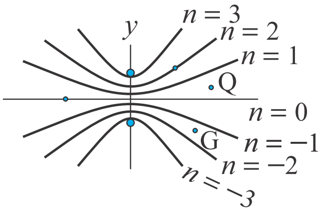
$$S_1P \sim S_2P = (n + \frac{1}{2})\lambda \quad (n = 0, 1, 2, ...) \quad (10.11)$$

થાય તો આપણને *વિનાશક વ્યતિકરણ* મળશે અને પરિણામી તીવ્રતા શૂન્ય થશે. હવે કોઈ અન્ય યાદચ્છિક બિંદુ G (આકૃતિ 10.10) માટે ધારોકે બે સ્થાનાંતરો વચ્ચેનો પથ તફાવત ϕ છે. આમ, જો S_1 દ્વારા ઉત્પન્ન સ્થાનાંતર

$y_1 = a \cos \omega t$



આકૃતિ 10.9 (a) બિંદુ Q કે જ્યાં પથ તફાવત 2λ છે ત્યાં રચાતું સહાયક વ્યતિકરણ છે. (b) બિંદુ R કે જ્યાં પથ તફાવત 2.5λ છે ત્યાં આગળ રચાતું વિનાશક વ્યતિકરણ છે.



આકૃતિ 10.10 જેના માટે $S_1P - S_2P$ એ શૂન્ય, $\pm\lambda$, $\pm 2\lambda$, $\pm 3\lambda$,ને બરાબર હોય તેવા બિંદુઓનું સ્થાન.

વડે અપાય, તો S_2 દ્વારા ઉત્પન્ન સ્થાનાંતર.

$y_2 = a \cos(\omega t + \phi)$

વડે અપાય છે અને પરિણામી સ્થાનાંતર નીચે મુજબ લખી શકાય.

$$y = y_1 + y_2$$
$$= a[\cos \omega t + \cos(\omega t + \phi)]$$
$$= 2a \cos(\phi/2) \cdot \cos(\omega t + \frac{\phi}{2})$$

$$\left[\because \ \cos A + \cos B = 2\cos\left(\frac{A+B}{2}\right)\cos\left(\frac{A-B}{2}\right)\right]$$

પરિણામી સ્થાનાંતરનો કંપવિસ્તાર $2\,a \cos(\phi/2)$ પદ મુજબ અપાશે અને તેથી તે બિંદુ આગળ તીવ્રતા નીચે મુજબ આપી શકાય.

$$I = 4\,I_0 \cos^2(\phi/2) \qquad (10.12)$$

જો $\phi = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi$... કે જે સમીકરણ (10.10) વડે અપાતી શરતને અનુરૂપ હોય તો આપણને સહાયક વ્યતિકરણ મળશે કે જેથી તીવ્રતા મહત્તમ મળશે. આનાથી વિરુદ્ધ, જો $\phi = \pm\pi$, $\pm 3\pi$, $\pm 5\pi$... (કે જે સમીકરણ (10.11)ની શરતને અનુરૂપ છે) તો આપણને વિનાશક વ્યતિકરણ મળશે અને તીવ્રતા શૂન્ય થશે.

હવે જો બે ઉદ્‌ગમો સુસમ્બધ્ધ હોય (એટલેકે બંને સોય ઉપર નીચે નિયમિત રીતે ગતિ કરતી હોય) તો કોઈ પણ બિંદુ આગળ કળા તફાવત સમય સાથે બદલાતો નહીં હોય અને આપણને સ્થિત વ્યતિકરણ ભાત મળશે; એટલે કે મહત્તમ અને ન્યૂનતમનાં સ્થાન સમય સાથે બદલાશે નહીં, પરંતુ બંને સોય અચળ કળાતફાવત જાળવી ના રાખે ત્યારે વ્યતિકરણ ભાત પણ સમય સાથે બદલાશે, અને જો કળાતફાવત સમય સાથે ખૂબ જ ઝડપથી બદલાતો જતો હોય તો મહત્તમ અને ન્યૂનતમનાં સ્થાનો પણ સમય સાથે ઝડપથી બદલાશે અને આપણને તીવ્રતાની સમય-સરેરાશ વહેંચણી જોવા મળશે. આવું જ્યારે પણ થાય, ત્યારે આપણને સરેરાશ તીવ્રતા દેખાશે કે જે

$$\langle I \rangle = 4\,I_0 \langle \cos^2(\phi/2) \rangle \qquad (10.13)$$

વડે અપાય છે. જ્યાં, કોણાકાર કૌંસ સમય પરનું સરેરાશ સૂચવે છે. પરિચ્છેદ 7.2માં દર્શાવ્યા મુજબ ખરેખર જો $\phi(t)$ એ સમય સાથે અસ્તવ્યસ્ત રીતે બદલાતું હોય તો સમય-સરેરાશ પદ $\langle \cos^2(\phi/2) \rangle$, 1/2 જેટલું થાય. આ પણ દેખીતી રીતે જ સહજ છે, કારણકે વિધેય $\cos^2(\phi/2)$ અસ્તવ્યસ્ત રીતે જે 0 થી 1ની વચ્ચે બદલાય છે, તેનું સરેરાશ મૂલ્ય 1/2 થાય. બધા જ બિંદુઓ આગળ પરિણામી તીવ્રતા

$$I = 2\,I_0 \qquad (10.14)$$

વડે અપાશે. જ્યારે બે દોલન કરતા ઉદ્‌ગમો વચ્ચેનો કળા તફાવત સમય સાથે બહુ ઝડપથી બદલાતો હોય, ત્યારે આપણે બે ઉદ્‌ગમો અસુસમ્બધ્ધ છે એમ કહીએ છીએ અને આવું જ્યારે થાય ત્યારે તીવ્રતાઓ એકબીજામાં ફક્ત ઉમેરાય છે. જ્યારે બે અલગ પ્રકાશ ઉદ્‌ગમો દિવાલને પ્રકાશિત કરતા હોય ત્યારે ખરેખર આવું બને છે.

Ripple Tank experiments on wave interference
http://www.colorado.edu/physics/2000/applets/fourier.html

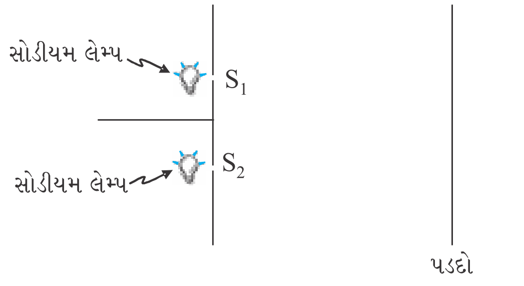
PHYSICS

10.5 પ્રકાશ તરંગોનું વ્યતિકરણ અને યંગનો પ્રયોગ (INTERFERENCE OF LIGHT WAVES AND YOUNG'S EXPERIMENT)

હવે આપણે પ્રકાશ તરંગોની મદદથી વ્યતિકરણની ચર્ચા કરીશું. આપણે જો બે સોડીયમ લૅમ્પનો ઉપયોગ કરી બે નાના છિદ્રોને પ્રકાશિત કરીએ (આકૃતિ 10.11) તો આપણને કોઈ પણ પ્રકારની વ્યતિકરણ શલાકાઓ જોવા મળશે નહીં. આવું થવાનું કારણ એ છે કે, સામાન્ય ઉદ્‌ગમ (સોડીયમ લૅમ્પ જેવાં) માંથી ઉત્સર્જિત પ્રકાશ તરંગ 10^{-9} સેકન્ડના સમયગાળામાં ત્વરીત (Abrupt) કળા તફાવત

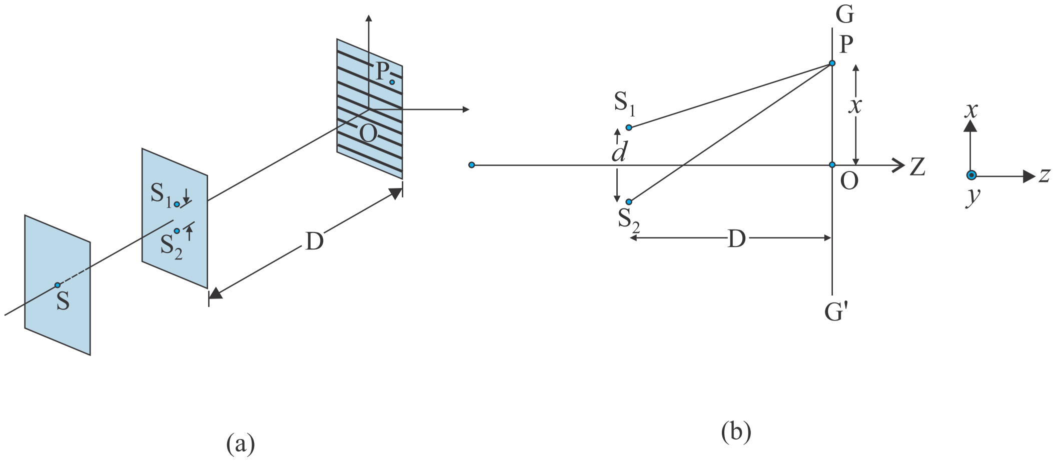
અનુભવતા હોય છે. આમ, બે સ્વતંત્ર ઉદ્‌ગમોમાંથી આવતા પ્રકાશ તરંગો માટે કોઈ ચોક્કસ કળા સંબંધ જળવાતો નથી અને તેથી તે અસુસમ્બધ્ધ હશે. જ્યારે આવું બને ત્યારે અગાઉના પરિચ્છેદમાં જોયું તેમ પડદા પરની તીવ્રતા એકબીજામાં (ફક્ત) ઉમેરાશે.

બ્રિટીશ ભૌતિકવિજ્ઞાની થોમસ યંગે યુક્તિપૂર્વક (Ingenious) S_1 અને S_2માંથી ઉત્સર્જિત તરંગોનો કળા તફાવત 'Lock' કરવાની તક્‌નિકનો ઉપયોગ કર્યો. તેણે એક અપારદર્શક પડદા [આકૃતિ 10.12(a)] ઉપર (ખૂબ પાસપાસે રહેલા) બે નાના S_1 અને S_2 સૂક્ષ્મ છિદ્રો કર્યા. આ બંનેને એક બીજા (અન્ય) સૂક્ષ્મ છિદ્ર S વડે પ્રકાશિત કર્યા કે જે પોતે પાછું એક તેજસ્વી ઉદ્‌ગમથી પ્રકાશિત કરેલું હતું.



આકૃતિ 10.11 જો બે સોડીયમ લૅમ્પ બે છિદ્રો S_1 અને S_2 ને પ્રકાશિત કરે તો, તીવ્રતાનો સરવાળો થાય છે અને પડદા ઉપર વ્યતિકરણ શલાકાઓ જોવા મળશે નહીં.

પ્રકાશતરંગો S માંથી બહાર તરફ ફેલાય અને S_1 અને S_2 બંને ઉપર પડે છે. પછી S_1 અને S_2 સુસમ્બધ્ધ ઉદ્‌ગમોની જેમ વર્તે છે કારણ કે S_1 અને S_2માંથી બહાર આવતા પ્રકાશ તરંગો એક જ મૂળ ઉદ્‌ગમમાંથી જ મેળવેલા છે અને કોઈ પણ પ્રકારનો ત્વરીત કળા-ફેરફાર એ S_1 અને S_2માંથી બહાર નીકળતા પ્રકાશમાં બરાબર એક સરખો કળા-ફેરફાર કરશે. આમ, કળા સંદર્ભમાં જાણે કે, બે ઉદ્‌ગમો S_1 અને S_2 Lock થઈ ગયાં છે; એટલે કે, તેઓ આપણાં પાણીમાંના તરંગોના ઉદાહરણ [આકૃતિ 10.8(a)]માંની બે સોયની જેમ બે સુસમ્બદ્ધ ઉદ્‌ગમો બનશે.



આકૃતિ 10.12 વ્યતિકરણ ભાત મેળવવા માટેની યંગની વ્યવસ્થા.

આમ, S_1 અને S_2માંથી ઉત્સર્જિત ગોળાકાર તરંગો, આકૃતિ 10.12(b)માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે, પડદા GG' પર વ્યતિકરણ શલાકાઓ રચે છે. પરિચ્છેદ 10.4માં દર્શાવ્યા મુજબ મહત્તમ અને ન્યૂનતમ તીવ્રતાઓના સ્થાન ગણી શકાય, કે જ્યાં આપણે દર્શાવ્યું હતું કે રેખા GG' [આકૃતિ 10.12(b)] પર આવેલ કોઈ યાદચ્છિક બિંદુ P આગળ તીવ્રતા જો મહત્તમ હોય તો,

$$S_2P - S_1P = n\lambda;\ n = 0, 1, 2 \ldots \tag{10.15}$$

થવું જ જોઈએ.

હવે, $(S_2P)^2 - (S_1P)^2 = \left[D^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2\right] - \left[D^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2\right] = 2xd$

થોમસ યંગ (Thomas Young) (1773-1829)

થોમસ યંગ (Thomas Young) (1773-1829) અંગ્રેજ ભૌતિક-વિજ્ઞાની, ચિકિત્સક અને ઈજિપ્તના પુરાતન અવશેષોનું અધ્યયન કરનાર. યંગે આંખના બંધારણ અને દૃષ્ટિ માટેની કાર્ય પ્રદ્ધત્તિથી રૉસેટા પથ્થર પરના ગૂઢ ભાષાના અગમ્ય લખાણના ઉકેલ સુધીના જુદાજુદા વૈજ્ઞાનિક કોયડાઓ પર કાર્ય કર્યું. તેણે પ્રકાશના તરંગવાદની વ્યતિકરણની ઘટના કે જે પ્રકાશનો તરંગપણાનો ગુણધર્મ ધરાવે છે તેની સાબિતી આપી, જેની મદદથી તરંગવાદને જીવતદાન આપ્યું.

જ્યાં, $S_1S_2 = d$ અને $OP = x$. આમ,

$$S_2P - S_1P = \frac{2xd}{S_2P + S_1P} \tag{10.16}$$

જો $x, d << D$ હોય તો $S_2P + S_1P$ (છેદમાં)ને સ્થાને 2D મૂકતાં અવગણ્ય ત્રૂટિ દાખલ થશે.

ઉદાહરણ તરીકે, $d = 0.1$ cm માટે D = 100 cm, OP = 1 cm (કે જે પ્રકાશ તરંગોથી કરવામાં આવતા પ્રયોગોમાં લાક્ષણિક મૂલ્યોને અનુરૂપ છે), તો

$$S_2P + S_1P = [(100)^2 + (1.05)^2]^{1/2} + [(100)^2 + (1.95)^2]^{1/2}$$
$$\approx 200.01 \text{ cm}$$

આમ, આપણે જો $S_2P + S_1P$ ને સ્થાને 2 D મૂકીએ તો સંકળાયેલ ત્રૂટિ લગભગ 0.005 % થશે. આ સંનિકટતામાં, સમીકરણ (10.16) નીચે મુજબ થશે.

$$S_2P - S_1P \approx \frac{xd}{D} \tag{10.17}$$

તેથી, જ્યારે

$$x = x_n = \frac{n\lambda D}{d}\ ;\ n = 0, \pm 1, \pm 2, ... \tag{10.18}$$

થાય ત્યારે આપણને સહાયક વ્યતિકરણ મળશે, પરિણામે તે વિભાગ પ્રકાશિત બનશે. તેનાથી ઊલટું, જ્યારે $\frac{xd}{D} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$; એટલે કે,

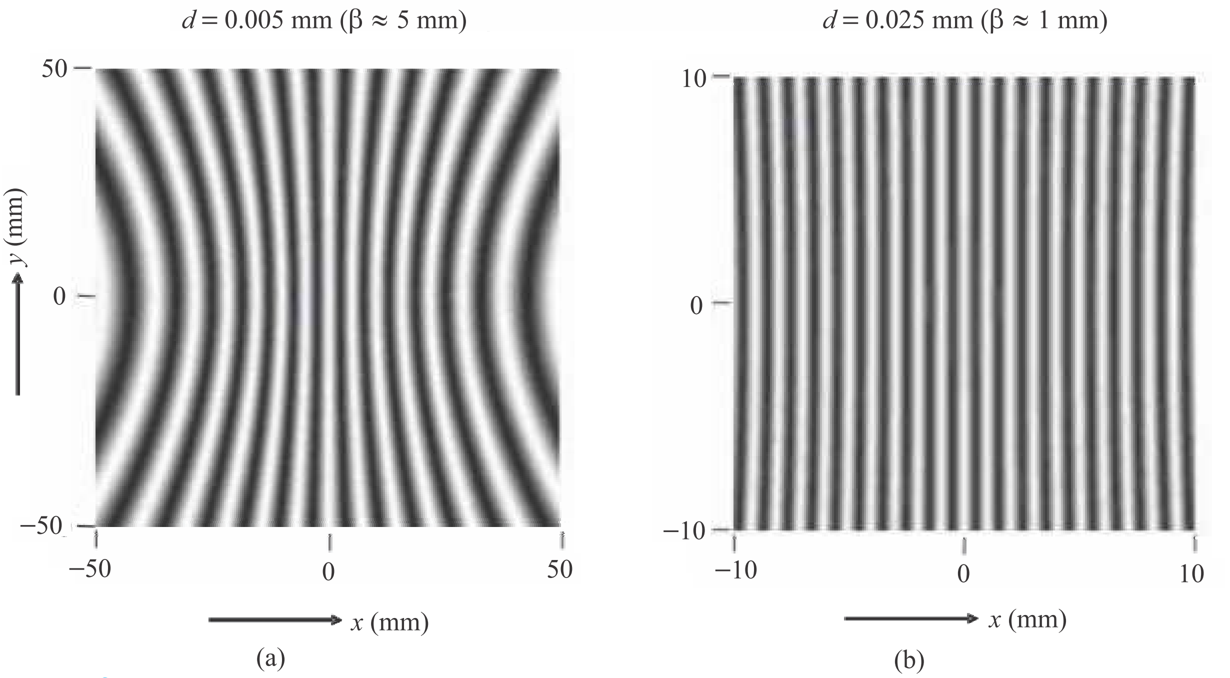
$$x = x_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda D}{d}\ ;\ n = 0, \pm 1, \pm 2, ... \tag{10.19}$$

થશે. ત્યારે આપણને અપ્રકાશિત વિભાગ મળશે.

આમ, આકૃતિ 10.13માં દર્શાવ્યા અનુસાર પડદા પર પ્રકાશિત અને અપ્રકાશિત પટ્ટાઓ જોવા મળશે. આવા પટ્ટાઓને *શલાકાઓ* કહે છે. સમીકરણો (10.18) અને (10.19) દર્શાવે છે કે અપ્રકાશિત અને પ્રકાશિત શલાકાઓ વચ્ચેનું અંતર સમાન હોય છે અને બે ક્રમિક પ્રકાશિત કે બે ક્રમિક અપ્રકાશિત શલાકાઓ વચ્ચેનું અંતર

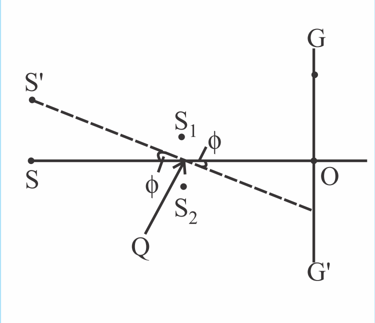
$$\beta = x_{n+1} - x_n\ ;\ \text{અથવા}\ \beta = \frac{\lambda D}{d} \tag{10.20}$$

વડે અપાય છે, કે જે *શલાકાઓની પહોળાઈ* માટેનું સમીકરણ છે. અત્રે, એ સ્વાભાવિક છે કે (આકૃતિ 10.12માં) કેન્દ્ર આગળનું બિંદુ O એ પ્રકાશિત હશે કારણકે $S_1O = S_2O$ અને તે $n = 0$ [સમીકરણ (10.18)] ને આનુષંગિક છે. હવે જો આપણે પુસ્તકના સમતલને લંબ અને જે Oમાંથી પસાર થતી હોય [એટલે કે, Y-અક્ષને સમાંતર] તેવી રેખા વિચારીએ તો તે રેખા પરના બધા બિંદુઓ S_1, S_2 થી સમાન અંતરે આવેલા હશે અને આપણને મધ્યસ્થ પ્રકાશિત શલાકા મળશે કે જે આકૃતિ 10.13માં દર્શાવ્યા અનુસાર સુરેખા હશે. પડદા ઉપર વ્યતિકરણ ભાતનો આકાર નક્કી કરવા માટે આપણે એ નોંધીએ કે કોઈ ચોક્કસ શલાકાએ એવા બિંદુઓના સ્થાનોને અનુરૂપ હોય છે કે જેના માટે $S_2P - S_1P$ અચળ હશે. જ્યારે જ્યારે આ અચળાંક λના પૂર્ણાંકગુણાંક બરાબર થશે ત્યારે શલાકા પ્રકાશિત હશે અને જ્યારે જ્યારે તે λ/2ના એકી પૂર્ણાંકગુણાંક બરાબર થશે ત્યારે તે અપ્રકાશિત હશે. જ્યારે xy-સમતલમાં રહેલ P બિંદુ કે જેથી $S_2P - S_1P\ (= \Delta)$ અચળ હોય ત્યારે તે બિંદુનો ગતિપથ અતિવલય (Hyperbola) છે. આમ, વધુ ચોક્કસાઈથી તો, શલાકાઓની ભાત એકદમ અતિવલય જ હોય છે, પરંતુ જો શલાકાની પહોળાઈની સરખામણીમાં D ખૂબ જ વધારે હોય તો શલાકાઓ લગભગ સુરેખા હોય છે, જે આકૃતિ 10.13માં દર્શાવેલ છે.



આકૃતિ 10.13 બે બિંદુવત્ ઉદ્ગમો S_1 અને S_2 માટે પડદા GG' (આકૃતિ 10.12) ઉપર કૉમ્પ્યુટર દ્વારા મેળવેલ શલાકાઓની ભાત; (a) અને (b) એ અનુક્રમે $d = 0.005$ mm અને $d = 0.025$ mmને અનુરૂપ છે (બંને આકૃતિઓમાં D = 5 cm અને $\lambda = 5 \times 10^{-5}$ cm છે.) (A. Ghatak, નાં પુસ્તક OPTICS ટાટા મેક્ગ્રોહીલ પબ્લીશીંગ કાં. લિમિટેડ, નવી દિલ્હી, 2000 માંથી લીધેલ છે.)

આકૃતિ 10.12 (b)માં દર્શાવેલ બે સ્લિટ પ્રયોગમાં, આપણે બે સ્લિટના લંબદ્વિભાજક રેખા SO ઉપર ઉદ્ગમ-છિદ્ર Sને લીધેલ છે ; જો ઉદ્ગમ S એ લંબદ્વિભાજકથી થોડે દૂર હોય તો શું થાય ? એવું વિચારો કે ઉદ્ગમ Sને કોઈક નવા સ્થાન S' આગળ ખસેડવામાં આવે છે અને ધારોકે Q એ S_1 અને S_2નું મધ્યબિંદુ છે. જો ખૂણો S'QS એ ϕ હોય તો મધ્યસ્થ પ્રકાશિત શલાકાએ, બીજી બાજુ, $-\phi$ જેટલા કોણે રચાશે. આમ જો ઉદ્ગમ S એ લંબદ્વિભાજક ઉપર આવેલો હોય તો મધ્યસ્થ શલાકા બિંદુ O આગળ અને લંબદ્વિભાજક ઉપર જ રચાશે. હવે, જો S એ ϕ જેટલા કોણે બિંદુ S' સુધી ખસે તો મધ્યસ્થ શલાકા $-\phi$ કોણે બિંદુ O' આગળ રચાશે. એનો અર્થ એ થયો કે તે લંબદ્વિભાજકની બીજીબાજુ એટલા જ કોણે ખસે છે. આનો અર્થ એ પણ થયો કે ઉદ્ગમ S', મધ્યબિંદુ Q અને મધ્યસ્થ શલાકાનું બિંદુ O' એક જ રેખામાં હશે.



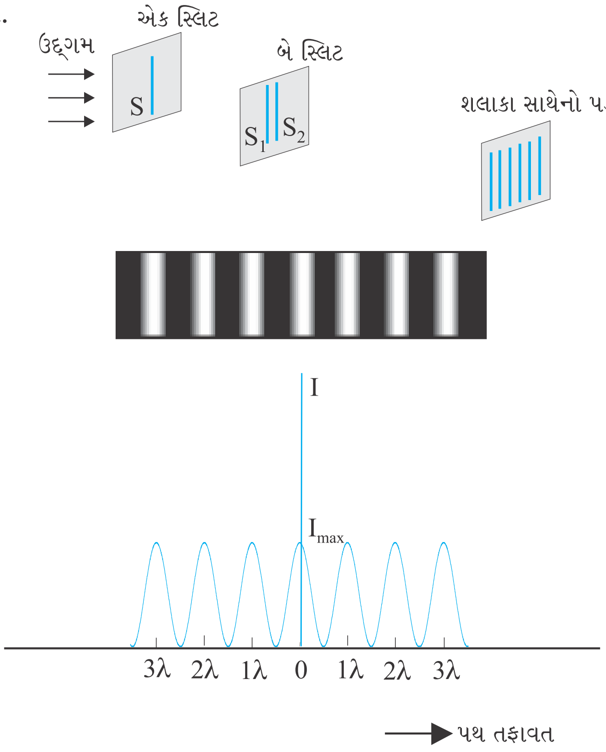
ડેનીસ્ ગાબર * (Dennis Gabor)ના નૉબેલ વ્યાખ્યાનની નોંધ સાથે આ વિભાગ પૂર્ણ કરીએ.

થોમસ યંગ દ્વારા 1801માં કરવામાં આવેલ અદ્ભુત સરળ પ્રયોગ દ્વારા પ્રકાશનો તરંગ સ્વભાવ પ્રથમ વખત ખાતરીપૂર્વક (Convincingly) દર્શાવવામાં આવ્યો. તેણે સૂર્યપ્રકાશના કિરણને રૂમમાં દાખલ થવા દીધો, તેની આગળ કાળો પડદો રાખ્યો, તેમાં બે નાના છિદ્રો કર્યા, અને તેનાથી આગળ અમુક અંતરે એક સફેદ પડદો રાખ્યો. તેણે બે પ્રકાશિત રેખાઓનાં બંને છેડે પ્રમાણમાં બે અપ્રકાશિત રેખાઓ જોઈ. આ ઘટનાએ તેને આ પ્રયોગ ફરીવાર કરવા પૂરતું પ્રોત્સાહન આપ્યું, પણ આ વખતે પ્રકાશ ઉદ્ગમ તરીકે સ્પિરિટ જ્યોત લીધી કે જેમાં થોડુંક મીઠું ઉમેરતાં સોડિયમનો તેજસ્વી પીળો પ્રકાશ ઉત્પન્ન થયો.

* ડેનીસ ગાબર (Dennis Gabor)ને 1971માં ભૌતિકશાસ્ત્રમાં હોલોગ્રાફીનો સિદ્ધાંતો શોધવા માટે નૉબેલ પુરસ્કારથી નવાજવામાં આવ્યા હતા.

આ વખતે તેણે સંખ્યાબંધ અપ્રકાશિત શલાકાઓ જોઈ, કે જે એકબીજાથી સરખા અંતરે હોય. આ પહેલી વખતની સ્પષ્ટ સાબિતી હતી કે પ્રકાશ એકબીજામાં ઉમેરાઈને અંધારું આપી શકે. આ ઘટનાને વ્યતિકરણ કહે છે. થોમસ યંગે આની અપેક્ષા રાખેલી હતી, કારણકે તે પ્રકાશના તરંગવાદમાં માનતો હતો.

આપણે અહીં એ જણાવવું જોઈએ કે S_1 અને S_2 બિંદુવત્ ઉદ્‌ગમો હોવા છતાં શલાકાઓ સીધી રેખા તરીકે મળે છે. જો આપણે બિંદુવત્ત ઉદ્‌ગમને બદલે સ્લિટ (આકૃતિ 10.14) લીધી હોત તો દરેક બિંદુઓની દરેક જોડ દ્વારા સુરેખ શલાકાઓ ઉત્પન્ન થઈ હોત અને પરિણામે વધેલી તીવ્રતા સાથેની સુરેખ શલાકાઓ મળત.



આકૃતિ 10.14 યંગના બે સ્લિટના પ્રયોગનો ફોટોગ્રાફ અને તીવ્રતા વિતરણનો આલેખ.

Interactive animation of Young's experiment
http://vsg.quasihome.com/interfer.html

PHYSICS

ઉદાહરણ 10.3

ઉદાહરણ 10.3 બે સ્લિટો વચ્ચેનું અંતર 1 mm અને પડદો 1 m દૂર રાખવામાં આવેલ છે. જ્યારે 500 nm તરંગલંબાઈનો બ્લ્યુ-ગ્રીન પ્રકાશ વાપરવામાં આવે ત્યારે શલાકાઓ વચ્ચેનું અંતર કેટલું હશે ?

ઉકેલ શલાકાઓ વચ્ચેનું અંતર $= \dfrac{D\lambda}{d} = \dfrac{1 \times 5 \times 10^{-7}}{1 \times 10^{-3}}$ m

$= 5 \times 10^{-4}$ m $= 0.5$ mm

ઉદાહરણ 10.4

ઉદાહરણ 10.4 નીચે દર્શાવેલ દરેક ક્રિયાને કારણે યંગના બે સ્લિટના પ્રયોગમાં વ્યતિકરણ શલાકાઓ ઉપર શું અસર થશે ?

(a) સ્લિટ ધરાવતા સમતલથી પડદાને દૂર ખસેડવામાં આવે;
(b) આપેલ (એકરંગી) પ્રકાશ ઉદ્‌ગમને બદલીને બીજો નાની તરંગલંબાઈ ધરાવતો (એકરંગી) પ્રકાશ ઉદ્‌ગમ લેવામાં આવે;
(c) બે સ્લિટ વચ્ચેનું અંતર વધારવામાં આવે;
(d) બે સ્લિટ ધરાવતા સમતલની નજીક ઉદ્‌ગમ-સ્લિટને ખસેડવામાં આવે;
(e) ઉદ્‌ગમ-સ્લિટની પહોળાઈ વધારવામાં આવે;

(f) એકરંગી પ્રકાશ ઉદ્‌ગમને બદલે સફેદ પ્રકાશ લેવામાં આવે :
(ઉપરના દરેક કિસ્સામાં જે સ્પષ્ટ રૂપે આપેલ છે તે સિવાયના બધા પ્રાચલોને અચળ લો.)

ઉકેલ

(a) ક્રમિક શલાકાઓ વચ્ચેનું કોણીય અંતર ($=\lambda/d$) અચળ રહે છે. વાસ્તવમાં શલાકાઓ વચ્ચેનું અંતર પડદાથી બે સ્લિટો ધરાવતા સમતલના અંતરના સમપ્રમાણ વધે છે.

(b) શલાકાઓ વચ્ચેનું અંતર (અને કોણીય અંતર પણ) ઘટે છે, પરંતુ નીચે આપેલ મુદ્દા (d)માં દર્શાવેલ શરત ધ્યાનમાં લો.

(c) શલાકાઓ વચ્ચેનું અંતર (અને કોણીય અંતર પણ) ઘટે છે, પરંતુ નીચે આપેલ મુદ્દા (d)માં દર્શાવેલ શરત ધ્યાનમાં લો.

(d) ધારોકે ઉદ્‌ગમનું માપ s છે અને બે સ્લિટ ધરાવતા સમતલથી તેનું અંતર S છે. વ્યતિકરણ શલાકા દેખાય તે માટેની શરત $s/\mathrm{S} < \lambda/d$ સંતોષાવી જોઈએ; અન્યથા ઉદ્‌ગમના જુદા-જુદા ભાગને કારણે ઉત્પન્ન થતી શલાકાઓ એકબીજા ઉપર સંપાત થાય છે અને કોઈ શલાકાઓ દેખાતી નથી. આમ, જેમ S ઘટશે (એટલે કે, ઉદ્‌ગમ-સ્લિટ નજીક લાવતાં) તેમ વ્યતિકરણ ભાતની તીક્ષ્ણતા (સ્પષ્ટતા) ઘટતી જાય છે, અને જ્યારે ઉદ્‌ગમને ખૂબ જ એટલું નજીક લાવવામાં આવે કે જેથી આ શરત ન પળાય, ત્યારે શલાકાઓ દેખાતી બંધ થાય છે. આ જ્યાં સુધી થાય (પળાય) ત્યાં સુધી બે શલાકાઓ વચ્ચેનું અંતર અચળ જળવાઈ રહે છે.

(e) મુદ્દા (d)માં દર્શાવ્યા મુજબ જ. જેમ ઉદ્‌ગમ-સ્લિટની પહોળાઈ વધારતા જઈએ તેમ વ્યતિકરણ ભાત ઓછી અને ઓછી સ્પષ્ટ થતી જાય છે, જ્યારે ઉદ્‌ગમ-સ્લિટ એટલી પહોળી થાય કે જેથી $s/\mathrm{S} \le \lambda/d$ શરત ન પળાય, ત્યારે વ્યતિકરણ ભાત દેખાવવાની બંધ થઈ જાય છે.

(f) સફેદ પ્રકાશની જુદા-જુદા ઘટક રંગના ઘટકોને કારણે મળતી વ્યતિકરણ ભાતો એકબીજા ઉપર (અસુસમ્બધ્ધ રીતે) સંપાત થાય છે. જુદાજુદા રંગોને કારણે મળતી મધ્યસ્થ પ્રકાશિત શલાકાઓ એક જ સ્થાને મળે છે. તેથી, મધ્યસ્થ શલાકા સફેદ છે. બિંદુ P, કે જેના માટે $\mathrm{S_2P} - \mathrm{S_1P} = \lambda_b/2$, જ્યાં, $\lambda_b (\approx 4000\ \text{Å})$ એ વાદળી (બ્લ્યુ) રંગની તરંગલંબાઈ દર્શાવે છે, ત્યાં આગળ (વાદળી) બ્લ્યુ ઘટક ગેરહાજર હશે અને શલાકા રાતા રંગની દેખાશે. તેનાથી થોડેક દૂર જતાં $\mathrm{S_2Q} - \mathrm{S_1Q} = \lambda_b = \lambda_r/2$, જ્યાં, $\lambda_r (\approx 8000\ \text{Å})$ એ રાતા રંગની તરંગલંબાઈ છે, ત્યાં શલાકા મુખ્યત્વે વાદળી (બ્લ્યુ) રંગની દેખાશે.
આમ, મધ્યસ્થ સફેદ શલાકાની બંને બાજુ તદ્દન નજીક આવેલ શલાકાએ રાતા રંગની અને સૌથી દૂર આવેલી શલાકા વાદળી (બ્લ્યુ) રંગની દેખાશે. અમુક શલાકાઓ પછી શલાકાની ભાત સ્પષ્ટ દેખાતી નથી.

ઉદાહરણ 10.4

10.6 વિવર્તન (DIFFRACTION)

આપણે જો અપારદર્શક વસ્તુ દ્વારા રચાયેલ પડછાયાને ધ્યાનથી જોઈએ તો તેના ભૌમિતિક પડછાયાની નજીકના વિસ્તારમાં, આપણને વ્યતિકરણમાં જેવા મળે છે તેવા જ વારાફરતી અપ્રકાશિત અને પ્રકાશિત વિસ્તાર જોવા મળે છે. આવું વિવર્તનની ઘટનાને કારણે થાય છે. વિવર્તન એ બધા જ પ્રકારના તરંગો, તે ભલેને ધ્વનિતરંગો, પ્રકાશ તરંગો, પાણી પરના તરંગો કે દ્રવ્ય તરંગો હોય, દ્વારા દર્શાવવાતો એક વ્યાપક

ગુણધર્મ છે. પ્રકાશની તરંગલંબાઈ મોટાભાગના અડચણોના પરિમાણોની સરખામણીમાં નાની હોવાથી આપણને રોજબરોજની જીંદગીમાં પ્રકાશની વિવર્તન અસર જોવા મળતી નથી. પરંતુ, આપણી આંખની અથવા પ્રકાશીય ઉપકરણો જેવાકે ટેલીસ્કોપ અથવા માઈક્રોસ્કોપની પરિમિત વિભેદન શક્તિ એ વિવર્તન ઘટનાને કારણે સીમિત થાય છે. CD (Compac disk) ને જોતાં તેના પર દેખાતા રંગો ખરેખર વિવર્તન અસરોને કારણે છે, હવે આપણે વિવર્તન ઘટનાની ચર્ચા કરીશું.

10.6.1 એક સ્લિટ (The Single Slit)

યંગના પ્રયોગની ચર્ચામાં, આપણે નોંધ્યું કે એક પાતળી સ્લિટ એક નવા ઉદ્‌ગમ તરીકે વર્તે છે, જેમાંથી પ્રકાશ બહાર તરફ ફેલાય છે. યંગ કરતા પહેલાંના ન્યુટન સહિતના પ્રયોગકર્તાઓએ પણ એવું નોંધ્યું હતું કે નાના છિદ્રોમાંથી કે પાતળી સ્લિટમાંથી પ્રકાશ ફેલાય છે, તે ખૂણાઓ આગળથી વાંકુ વળે છે, અને એવો ભાગ કે જ્યાં આપણે પડછાયો અપેક્ષિત કર્યો હોય તે ભાગમાં પણ દાખલ થાય છે. *વિવર્તન* તરીકે ઓળખાતી આ અસરોની સાચી સમજ તરંગ વિચારથી જ આપી શકાય છે. ખૂણામાં ઉભેલી વ્યક્તિ દ્વારા થતી વાતોના ધ્વનિ તરંગો સાંભળીને તમે સહેજ પણ અચંબિત થતા નથી !

યંગના પ્રયોગમાં બે સ્લિટને સ્થાને એક પાતળી સ્લિટ મૂકવામાં આવે છે (જેને એકરંગી ઉદ્‌ગમથી પ્રકાશિત કરવામાં આવે છે), ત્યારે પડદા ઉપર મધ્યસ્થ પ્રકાશિત ભાગ ધરાવતી પહોળી ભાત જોવા મળે છે. બંને બાજુએ, વારાફરતી અપ્રકાશિત અને પ્રકાશિત વિભાગો જોવા મળે છે કે જેની તીવ્રતા કેન્દ્રથી દૂર જતા જઈએ તેમ નબળી પડતી જાય છે. (આકૃતિ 10.16). આ સમજવા માટે, આકૃતિ 10.15 જુઓ, જે દર્શાવે છે કે એક a પહોળાઈની સ્લિટ LN ઉપર એક સમાંતર પ્રકાશ કિરણ લંબરૂપે પડે છે. વિવર્તીત પ્રકાશ આગળ જઈ પડદા ઉપર મળે છે. સ્લિટનું મધ્યબિંદ M છે.

Mમાંથી પસાર થતી અને સ્લિટના સમતલને લંબ સુરેખાએ પડદાના C બિંદુએ મળે છે. આપણને પડદા પરના કોઈ બિંદુ P આગળ તીવ્રતા જોઈએ છે. અગાઉની જેમ જ બિંદુઓ L, M, N વગેરેને બિંદુ P સાથે જોડતી સુરેખાઓને એકબીજા સાપેક્ષ સમાંતર ગણી શકાય કે જે લંબ MC સાથે θ કોણ બનાવે છે.

અત્રે, મૂળભૂત વિચાર એવો છે કે સ્લિટને આપણે ખૂબ નાના નાના વિભાગમાં વહેંચી દઈએ અને P આગળ તેમના દરેકના ફાળાને યોગ્ય કળા તફાવત સાથે ઉમેરીએ. આપણે સ્લિટ આગળ તરંગઅગ્રના જુદા જુદા વિભાગોને ગૌણ ઉદ્‌ગમો તરીકે લઈએ છીએ. કારણ કે આપાત તરંગઅગ્રએ સ્લિટના સમતલને સમાંતર છે, અને આ ઉદ્‌ગમો એકબીજા સાથે સમાન કળામાં છે.

સ્લિટના બે છેડાઓ વચ્ચેનો પથતફાવત NP – LPને યંગના પ્રયોગની જેમ જ ગણી શકાય. આકૃતિ 10.15 પરથી,

$$\begin{aligned} NP - LP &= NQ \\ &= a\sin\theta \\ &\approx a\theta \text{ (નાના ખૂણા માટે)} \end{aligned} \qquad (10.21)$$

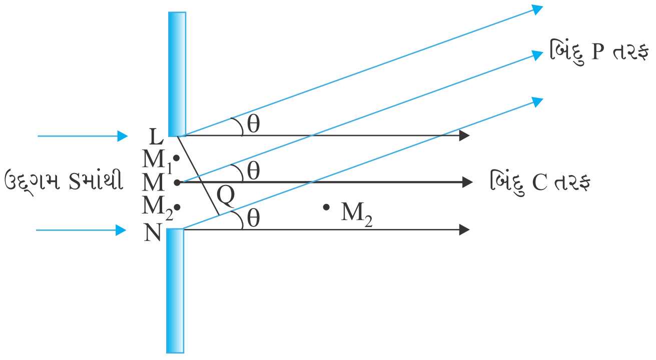
તે જ રીતે, સ્લિટના સમતલમાં આવેલા બે બિંદુઓ M_1 અને M_2 વચ્ચેનું અંતર y હોય તો પથ તફાવત $M_2P - M_1P \approx y\theta$ છે. હવે, આપણે ઘણાં બધા ઉદ્‌ગમોનાં સમાન અને સુસમ્બધ્ધ ફાળાનો સરવાળો કરવાનો છે, જે દરેક જુદી જુદી કળા ધરાવે છે. આવી ગણતરી ફ્રેનલ (Fresnel) એ સંકલનના કલનશાસ્ત્રની મદદથી કરી હતી, તેથી તેને આપણે અત્રે ધ્યાનમાં નહીં લઈએ. વિવર્તન ભાતની મુખ્ય લાક્ષણિકતાઓ સરળ તર્કની મદદથી સમજી શકાય છે.

પડદાના મધ્યબિંદુ C આગળ કોણ θ શૂન્ય છે. બધા જ પથતફાવતો શૂન્ય છે અને તેથી સ્લિટના દરેક ભાગ સમાન કળામાં રહીને ફાળો આપે છે. આ C બિંદુ આગળ મહત્તમ તીવ્રતા મળે છે.

આકૃતિ 10.15માં દર્શાવેલ પ્રાયોગિક અવલોકન સૂચવે છે કે તીવ્રતા $\theta = 0$ આગળ મધ્યસ્થ અધિક્તમ અને $\theta \approx (n + 1/2)\lambda/a$ આગળ બીજા ગૌણ મહત્તમો અને $\theta \approx n\lambda/a$ આગળ ન્યૂનતમો (શૂન્ય તીવ્રતા) આપે છે; જ્યાં $n = \pm1, \pm2, \pm3, ...$ છે. અત્રે, એ સહેલાઈથી જોઈ શકાય છે કે આ ખૂણાઓ આગળ ન્યૂનતમો કેમ આવેલા છે પહેલા એવો θ ધ્યાનમાં લો કે જેથી પથતફાવત $a\theta$ એ λ જેટલો હોય તો

$$\theta \approx \lambda/a. \tag{10.22}$$

હવે, સ્લિટને બે સરખાં ભાગ LM અને MNમાં વહેંચો, કે જેથી દરેકની લંબાઈ $a/2$ થાય. LMના દરેક બિંદુ M_1 માટે MNમાં કોઈક બિંદુ M_2 એવું મળશે કે જેથી $M_1M_2 = a/2$ થાય. બિંદુ P આગળ આપેલ કોણ માટે M_1 અને M_2 વચ્ચેનો પથ તફાવત $M_2P - M_1P = \theta a/2 = \lambda/2$ થશે.



આકૃતિ 10.15 એક સ્લિટથી થતા વિવર્તન માટે પથ તફાવત દર્શાવતી ભૂમિતિ.

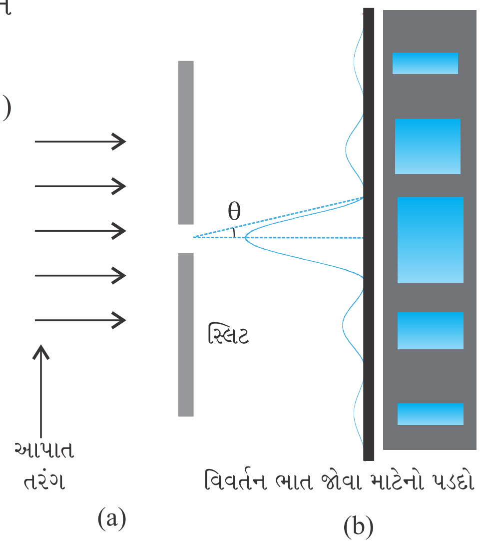
આનો અર્થ એ થયો કે M_1 અને M_2માંથી આવતો ફાળો (યોગદાન) એકબીજાની સાથે 180°નો કળા તફાવત ધરાવે છે અને $\theta = \lambda/a$ દિશામાં એકબીજાની અસર નાબૂદ કરે છે. સ્લિટના બે ભાગો LM અને MNનો ફાળો આ કારણથી એકબીજાને નાબૂદ કરશે. સમીકરણ (10.22) એ કયા કોણે તીવ્રતા ઘટીને શૂન્ય થશે તે દર્શાવે છે. આ જ રીતે આપણે દર્શાવી શકીએ કે $\theta = n\lambda/a$ માટે તીવ્રતા શૂન્ય થશે, જ્યાં n એ પૂર્ણાંક છે (શૂન્ય સિવાયનો !). અત્રે, એ નોંધો કે જ્યારે સ્લિટની પહોળાઈ a ઘટાડવામાં આવે છે ત્યારે મધ્યસ્થ અધિક્તમની કોણીય પહોળાઈ વધે છે.

$\theta = (n + 1/2)\lambda/a$ આગળ મહત્તમો કેમ મળે છે અને શા માટે તે nની કિંમત વધતા વધારેને વધારે નબળા પડતા જાય તે પણ સહેલાઈથી જોઈ શકાય છે. એક $\theta = 3\lambda/2a$ કોણ ધ્યાનમાં લો કે જે બે અપ્રકાશિત શલાકાઓની મધ્યમાં આવેલ છે. સ્લિટને ત્રણ સરખા ભાગમાં વહેંચો. જો આપણે સ્લિટના પહેલા બે તૃતીયાંશ ભાગને ધ્યાનમાં લઈએ, તો તેમના બે છેડા વચ્ચેનો પથતફાવત નીચે મુજબ મળશે.

$$\frac{2}{3}a \times \theta = \frac{2a}{3} \times \frac{3\lambda}{2a} = \lambda \tag{10.23}$$

સ્લિટનો પ્રથમ બે-ત્રત્યાંશ ભાગ તેથી જ જેને $\lambda/2$ જેટલો પથતફાવત છે તેવા બે અર્ધભાગમાં વહેંચાયેલા છે. અગાઉ વર્ણવ્યું તે મુજબ આ બંને અર્ધભાગોનો ફાળો એકબીજાની અસર નાબૂદ કરે છે. સ્લિટનો બાકી રહેલો એક તૃત્યાંશ ભાગ જ બે ન્યૂનતમો વચ્ચેના બિંદુ આગળ તીવ્રતા આપે છે. તે સ્પષ્ટ જ છે કે આની તીવ્રતા મધ્યસ્થ મહત્તમ, કે જ્યાં પૂરેપૂરી સ્લિટ એકસાથે કળામાં પોતાનું યોગદાન આપે છે તેના કરતાં ખૂબ જ નબળી હશે. આ જ રીતે આપણે બતાવી શકીએ કે $(n + 1/2)\lambda/a$ આગળ મહત્તમો મળશે કે જ્યાં, $n = 2, 3, ...$ વગેરે. વધતાં n સાથે તેમની તીવ્રતા નબળી પડતી જશે, કારણ કે આ કિસ્સામાં સ્લિટનો ફક્ત એક પંચમાંશ, એક સપ્તમાંશ, વગેરે ભાગ જ ફાળો આપશે. આને અનુરૂપ ફોટોગ્રાફ અને તીવ્રતા-ભાત (આકૃતિ 10.16)માં દર્શાવેલ છે.

આ ઘટનાની શોધ થઈ ત્યારથી જ વૈજ્ઞાનિકો વચ્ચે વ્યતિકરણ અને વિવર્તન વચ્ચેના તફાવત માટે ખૂબ જ લાંબી ચર્ચા થયેલી.

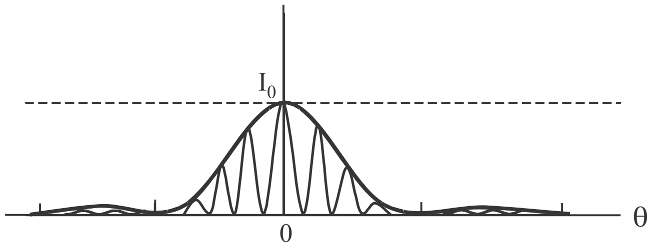


આકૃતિ 10.16 એક સ્લિટથી મળતા વિવર્તન માટે તીવ્રતા વહેંચણી અને શલાકાઓનો ફોટોગ્રાફ.

આ સંદર્ભમાં એ નોંધવું રસપ્રદ બનશે કે રિચાર્ડ ફિનમન* તેમના વિખ્યાત Feynmann Lectures on Physicsમાં કહ્યું છે, તે નોંધવું રસપ્રદ છે :

વ્યતિકરણ અને વિવર્તન વચ્ચેના તફાવતની લગભગ કોઈ જ સંતોષકારક વ્યાખ્યા આપી શક્યું નથી. એ ફક્ત કેવી રીતે તેનો ઉપયોગ કરો છો તેના પર આધારિત છે, અને તેમની વચ્ચે કોઈ વિશિષ્ટ અને અગત્યનો ભૌતિકશાસ્ત્રીય તફાવત નથી. સારામાં સારુ આપણે આવું કરી શકીએ કે, જ્યારે બહુ થોડા ઉદ્‌ગમોની દખલની વાત હોય, દા. ત. બે ઉદ્‌ગમો, તો તેનાં પરિણામને સામાન્ય રીતે વ્યતિકરણ કહે છે, પણ જો સંખ્યાબંધ ઉદ્‌ગમો હોય તો વિવર્તન શબ્દનો વધુ ઉપયોગ થાય છે.

બે સ્લિટના પ્રયોગમાં, આપણે એ નોંધવુ જોઈએ કે પડદા પરની ભાત એ દરેક સ્લિટ અથવા છિદ્રને કારણે મળતા એક-સ્લિટ વિવર્તનનાં સંપાતીકરણને અને બે-સ્લિટથી મળતા વ્યતિકરણને કારણે છે. આ (આકૃતિ 10.17)માં દર્શાવેલ છે. તે એક પહોળી વિવર્તન ટોચ (Peak) દર્શાવે છે કે જેમાં બે-સ્લિટથી મળતા વ્યતિકરણને કારણે મળતી ઓછી પહોળાઈની ઘણી બધી શલાકાઓ આવેલી છે. આપેલ પહોળી વિવર્તન ટોચ (Peak)માં આવેલ વ્યતિકરણ શલાકાઓની સંખ્યાએ d/a ગુણોત્તર પર એટલે કે બે સ્લિટો વચ્ચેના અંતર અને સ્લિટની પહોળાઈના ગુણોત્તર પર આધારિત છે. aના ખૂબ જ નાના મૂલ્યના લક્ષ માટે વિવર્તન ભાત ખૂબ જ સપાટ (ચપ્પટ) બનશે અને આપણે બે-સ્લિટને કારણે મળતા વ્યતિકરણ માટેની ભાત [આકૃતિ 10.13(b) જુઓ] જોઈ શકીશું.



આકૃતિ 10.17 બે-સ્લિટથી મળતી વાસ્તવિક વ્યતિકરણ ભાત. આવરણ (Envelope) એ એક-સ્લિટથી થતું વિવર્તન દર્શાવે છે.

Interactive animation of single slit diffraction pattern
http://www.phys.hawaii.edu/~teb/optics/java/slitdiffr/

PHYSICS

ઉદાહરણ 10.5

ઉદાહરણ 10.5 ઉદાહરણ 10.3માં દરેક સ્લિટની પહોળાઈ કેટલી હોવી જોઈએ કે જેથી એક-સ્લિટની ભાતમાંની મધ્યસ્થ અધિક્તમમાં બે-સ્લિટ ભાતનાં 10 મહત્તમો આવે ?

ઉકેલ આપણને $a\theta = \lambda, \theta = \frac{\lambda}{a}$ જોઈએ છે.

$$10\frac{\lambda}{d} = 2\frac{\lambda}{a}; \quad a = \frac{\lambda}{5} = 0.2\,\text{mm}$$

અત્રે, એ નોંધો કે પ્રકાશની તરંગલંબાઈ અને પડદા સુધીનું અંતર એ aની ગણતરીમાં દાખલ થતું નથી.

આકૃતિ 10.12ના બે સ્લિટ વ્યતિકરણ પ્રયોગમાં જો આપણે એક સ્લિટ બંધ કરીએ તો શું થાય ? તમે જોશો કે હવે તે એક સ્લિટ જેમ વર્તે, પરંતુ તમારે તે ભાતમાં કંઈક સ્થાનાંતર (Shift) થતું હોવાનું ધ્યાને રાખવું પડશે. હવે આપણી પાસે ઉદ્‌ગમ S આગળ એક છિદ્ર (અથવા સ્લિટ) S_1 અથવા S_2 છે. આનાથી પડદા પર એક સ્લિટ વિવર્તન ભાત રચાશે.

મધ્યસ્થ પ્રકાશિત શલાકાનું કેન્દ્ર એ બિંદુ આગળ મળશે કે જે સીધી રેખા SS_1 અથવા SS_2, જે કિસ્સો હોય તેને અનુરૂપ, ઉપર આવેલ હોય.

હવે, આપણે વ્યતિકરણ ભાત અને સુસમ્બધ્ધ રીતે એક સ્લિટથી પ્રકાશિત (જેને સામાન્ય રીતે એક-સ્લિટ વિવર્તન ભાત કહે છે) વચ્ચેની સરખામણી અને તફાવત નોંધીશું.

* રિચર્ડ ફિનમન તેમના ક્વૉન્ટમ ઈલેક્ટ્રોડાયનેમિક્સમાંના મૂળભૂત કાર્ય માટે 1965નું ભૌતિકવિજ્ઞાન માટેનું નૉબેલ પ્રાઈઝ પ્રાપ્ત કરનારામાંના એક હતા.

(i) વ્યતિકરણ ભાતમાં એકબીજાથી સરખા અંતરે રહેલ ઘણા પ્રકાશિત અને અપ્રકાશિત પટ્ટાઓ રહેલ હોય છે. વિવર્તન ભાતમાં એક મધ્યસ્થ પ્રકાશિત (તેજસ્વી) અધિક્તમ હોય છે કે જે બીજા અધિક્તમો કરતા લગભગ બમણી પહોળાઈનું હોય છે. આપણે કેન્દ્રથી બંને બાજુ ક્રમશઃ આવતા મહત્તમો તરફ જઈએ તેમ તીવ્રતા ઘટતી જાય છે.

(ii) આપણે વ્યતિકરણ ભાતની ગણતરી બે સાંકડી સ્લિટમાંથી ઉદ્‌ભવેલા બે તરંગોના સંપાતીકરણની મદદથી કરીએ છીએ. એક સ્લિટના દરેક બિંદુ આગળથી ઉદ્‌ભવતા તરંગોની સતત હારમાળાનાં સંપાતીકરણને કારણે વિવર્તન ભાત મળે છે.

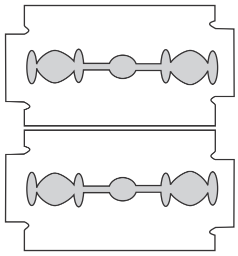
(iii) a પહોળાઈની એક સ્લિટ માટે વ્યતિકરણ ભાતમાં પ્રથમ શૂન્ય (તીવ્રતા) એ λ/a જેટલા કોણે મળે છે. આ જ λ/a કોણે a અંતરે છૂટી પાડેલ બે પાતળી સ્લિટ માટે આપણને મહત્તમ (અને શૂન્ય નહીં) મળે છે.

આપણે એ સમજવું જરૂરી છે કે d અને a બંને ખૂબ જ નાના હોવા જોઈએ કે જેથી સ્પષ્ટ વ્યતિકરણ અને વિવર્તન ભાત જોઈ શકાય. ઉદાહરણ તરીકે, બે સ્લિટ વચ્ચેનું અંતર d એ મિલિમીટરના ક્રમનું હોવું જોઈએ. દરેક સ્લિટની પહોળાઈ a નાની હોવી જોઈએ, લગભગ 0.1થી 0.2 mmના ક્રમની.

આપણી યંગના પ્રયોગની અને એક-સ્લિટ વિવર્તનની ચર્ચામાં આપણે એવું ધારી લીધું છે કે શલાકા જે પડદા પર રચાય છે તે ખૂબ મોટા અંતરે રાખેલ છે. સ્લિટથી પડદા સુધી પહોંચતા બે કે તેથી વધારે પથને આપણે સમાંતર લીધાં હતાં. આ સ્થિતિ, સ્લિટ પછી બહિર્ગોળ લેન્સ મૂકી અને પડદાને તેના કેન્દ્ર ઉપર મૂકીને પણ મળી શકે. સ્લિટમાંથી નીકળતા સમાંતર પથો પડદાના એક બિંદુએ ભેગાં કરી શકાય. *એ નોંધો કે લેન્સ એ આ સમાંતર કિરણપૂંજમાં કોઈ વધારાનો પથતફાવત ઉમેરતો નથી.* આ રચના ઘણી વખત ઉપયોગમાં લેવામાં આવે છે. કારણ કે પડદાને દૂર મૂકવા કરતા આ કિસ્સામાં તીવ્રતા વધારે મળે છે. જો લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ f હોય તો આપણે સહેલાઈથી મધ્યસ્થ પ્રકાશિત મહત્તમની પહોળાઈ ગણી શકીએ. ખૂણાના સંદર્ભમાં, વિવર્તન ભાતમાં મધ્યસ્થ અધિક્તમ અને પ્રથમ શૂન્ય વચ્ચેનું અંતર λ/a થશે. તેથી પડદા પરની પહોળાઈ $f\lambda/a$ થશે.

10.6.2 એક-સ્લિટ વિવર્તન ભાતને જોવી (Seeing the Single Slit Diffraction Pattern)

આપણી જાતે એક-સ્લિટ વિવર્તન ભાત જોવી ખૂબ જ સરળ છે. તેના માટે જરૂરી ઉપકરણ એ દરેક ઘરમાં મળી રહે છે- બે રેઝર બ્લેડ અને શક્ય હોય તો જેમાં સીધો ફિલામેન્ટ આવેલો હોય તેવો એક પારદર્શક કાચનો બલ્બ. બે બ્લેડને એવી રીતે જોડે પકડી રાખો કે તેમની ધાર એકબીજાને સમાંતર રહે અને તેમની વચ્ચે એક પાતળી સ્લિટ રચાય. આ અંગૂઠા અને આગળની આંગળીઓની મદદથી સહેલાઈથી કરી શકાય છે (આકૃતિ 10.18).



આકૃતિ 10.18 બે બ્લેડને પકડી એક સ્લિટ બનાવવી. બલ્બના ફિલામેન્ટ (તાર)ને આમાંથી જોતાં સ્પષ્ટ વિવર્તન પટ્ટાઓ દેખાય છે.

સ્લિટને ફિલામેન્ટને સમાંતર બરાબર આંખની સામે રાખો. જો તમે ચશ્મા પહેરતા હો તો પહેરી લો. સ્લિટની પહોળાઈમાં અને તેના સમાંતરપણામાં થોડોક ફેરફાર કરો, તો તમને પ્રકાશિત અને અપ્રકાશિત પટ્ટાના સ્વરૂપમાં ભાત દેખાશે. બધા જ પટ્ટાનું સ્થાન (મધ્યસ્થ સિવાય) તરંગલંબાઈ ઉપર આધારીત હોવાથી તેમાં અમુક રંગો દેખાશે. રાતા અથવા વાદળી (બ્લ્યુ) માટે ફિલ્ટર વાપરવાથી શલાકાઓને સ્પષ્ટ રીતે જોઈ શકાય છે. બંને ફિલ્ટરો સહેલાઈથી ઉપલબ્ધ હોવાથી, રાતા રંગની શલાકાની પહોળાઈ વાદળી (બ્લ્યુ) રંગ કરતાં વધારે હોય છે તે જોઈ શકાય છે.

આ પ્રયોગમાં ફિલામેન્ટ એ આકૃતિ 10.16માં દર્શાવેલ પ્રથમ સ્લિટ Sનો ભાગ ભજવે છે. આંખનો લેન્સ ભાતને પડદા (આંખના રેટીના) ઉપર કેન્દ્રિત કરે છે.

થોડાક પ્રયત્નોથી, બ્લેડની મદદથી ઍલ્યુમીનીયમનાં વરખમાં બે સ્લિટ કાપી શકાય. અગાઉની જેમ જ બલ્બના ફિલામેન્ટને જોઈ યંગના પ્રયોગનું પુનરાવર્તન કરી શકાય. દિવસના પ્રકાશનાં રૂપમાં આંખ સાથે નાનો કોણ રચતો હોય તે રીતે આપણને બીજો એક યોગ્ય અને પ્રકાશિત ઉદ્‌ગમ ઉપલબ્ધ છે. આ કોઈ ચળકતી બહિર્ગોળ સપાટી (દા.ત. સાયકલની ઘંટડી) પરથી પરાવર્તન પામતો સૂર્યપ્રકાશ હોઈ શકે. સીધે સીધા સૂર્યપ્રકાશથી પ્રયત્ન ના કરો તે આંખને નુકશાન પહોંચાડી શકે છે અને તે પાછી શલાકાઓ તો આપશે જ નહીં કારણકે સૂર્ય લગભગ $(1/2)^{\circ}$નો કોણ રચે છે.

વ્યતિકરણ અને વિવર્તનમાં, પ્રકાશની ઊર્જાનું ફરીવાર વિતરણ થાય છે. જો તે એક ભાગમાં ઘટીને, અપ્રકાશિત શલાકા રચે, તો બીજા ભાગમાં વધીને, પ્રકાશિત શલાકા રચે છે. ઊર્જામાં કોઈ પણ પ્રકારનો વધારો કે ઘટાડો થતો નથી, કે જે ઊર્જા સંરક્ષણના નિયમ સાથે સુસંગત છે.

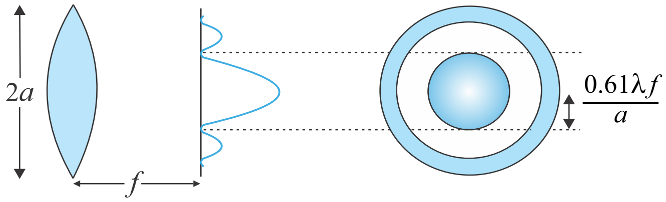
10.6.3 પ્રકાશીય ઉપકરણોની વિભેદન શક્તિ (Resolving Power of Optical Instruments)

આપણે ધોરણ IXમાં ટેલિસ્કોપ વિશે ચર્ચા કરી હતી. ટેલિસ્કોપનું કોણીય વિભેદન એ ટેલિસ્કોપના ઓબ્જેક્ટીવ (લેન્સ) દ્વારા નક્કી થાય છે. ઓબ્જેક્ટિવ વડે મેળવેલ પ્રતિબિંબમાં જે તારાઓનું વિભેદન મળતું ન હોય તેમનું વિભેદન આઈપીસ (નેત્રકાચ) દ્વારા ગમે તેટલી મોટવણી વધારવા છતાં પણ મળી શકે નહીં. આઈપીસનો પ્રાથમિક હેતુ ઓબ્જેક્ટિવ દ્વારા મળતા પ્રતિબિંબની મોટવણી વધારવાનો છે.

એક બહિર્ગોળ લેન્સ ઉપર સમાંતર પ્રકાશ કિરણપૂંજ પડે છે તેમ વિચારો. જો લેન્સને ક્ષતિઓ (Aberration) માટે બરાબર સુધારેલ હોય તો ભૌમિતિક પ્રકાશશાસ્ત્ર આપણને જણાવે છે કે કિરણપૂંજ એક બિંદુ આગળ કેન્દ્રિત થશે. પરંતુ, વિવર્તનને કારણે, કિરણપૂંજ એક જ બિંદુ આગળ કેન્દ્રિત થવાને બદલે પરિમિતિ ક્ષેત્રફળ ધરાવતા ટપકાં સ્વરૂપે કેન્દ્રિત થશે. આ કિસ્સામાં વિવર્તનની અસરો એક સમતલ તરંગને વર્તુળાકાર દર્પણમુખ (Aperture) અને ત્યારબાદ મૂકેલા બહિર્ગોળ લેન્સ (આકૃતિ 10.19) પર આપાત થતું ગણીને સમજાવી શકાય છે. આને અનુરૂપ વિવર્તન ભાતનું વિશ્લેષણ ખૂબ જ જટિલ છે; પરંતુ સૈદ્ધાંતિક રીતે, તે એક-સ્લિટથી મળતી વિવર્તન ભાતના કિસ્સા જેવું જ છે. વિવર્તનની અસરોને ધ્યાનમાં લઈએ તો મુખ્ય સમતલ (Focal Plane) ઉપર મળતી ભાત એ સમકેન્દ્રિય અપ્રકાશિત અને પ્રકાશિત વલયોથી ઘેરાયેલા એક મધ્યસ્થ પ્રકાશિત વિસ્તાર તરીકે જણાય છે (આકૃતિ 10.19). વિસ્તૃત વિશ્લેષણ દર્શાવે છે કે મધ્યસ્થ પ્રકાશિત વિભાગની ત્રિજ્યાનું સંન્નિકટ મૂલ્ય

$$r_0 \approx \frac{1.22\lambda f}{2a} = \frac{0.61\lambda f}{a} \qquad (10.24)$$

વડે અપાય છે.



આકૃતિ 10.19 બહિર્ગોળ લેન્સ ઉપર પ્રકાશનું એક સમાંતર કિરણપૂંજ આપાત થાય છે. વિવર્તન અસરોને કારણે, કિરણપૂંજ લગભગ $\approx 0.61\ \lambda f/a$ જેટલી ત્રિજ્યા ધરાવતાં ટપકાં સ્વરૂપે કેન્દ્રિત થાય છે.

જ્યાં, f એ લેન્સની કેન્દ્રલંબાઈ અને $2a$ એ વર્તુળાકાર દર્પણમુખનો વ્યાસ અથવા લેન્સનો વ્યાસ એ બેમાંથી જે નાનું હોય તે છે. લાક્ષણિક રીતે, જો

$\lambda \approx 0.5\,\mu m$, $f \approx 20$ cm અને $a \approx 5$ cm હોય તો, આપણને

$r_0 \approx 1.2\,\mu m$ મળે છે.

ભલે ટપકાંની પહોળાઈ ખૂબ નાની છે છતાં, તે પ્રકાશીય ઉપકરણો જેવાં કે ટેલિસ્કોપ અથવા માઈક્રોસ્કોપની વિભેદનશક્તિ નક્કી કરવામાં અગત્યનો ભાગ ભજવે છે. બે તારાઓ માટે વિભેદન થાય તે માટે,

$$f\Delta\theta \approx r_0 \approx \frac{0.61\,\lambda f}{a}$$

આ પરથી, $\Delta\theta \approx \dfrac{0.61\,\lambda}{a}$ જોઈશે. (10.25)

આમ, જ્યારે ઓબ્જેક્ટિવનો વ્યાસ વધારે હશે ત્યારે $\Delta\theta$ એ નાનો. થશે આનો અર્થ એ થયો કે ટેલિસ્કોપ માટે જેમ a મોટો હોય તેમ તેની વિભેદનશક્તિ વધારે. આ કારણને લીધે વધારે વિભેદન માટે ટેલિસ્કોપના ઓબ્જેક્ટિવનો વ્યાસ મોટો હોવો જોઈએ.

ઉદાહરણ 10.6 એવું ધારોકે તારામાંથી 6000 Å તરંગલંબાઈનો પ્રકાશ આવે છે. જેનાં ઓબ્જેક્ટિવનો વ્યાસ 100 ઈંચ હોય તેવા ટેલિસ્કોપ માટે વિભેદનની સીમા શું હશે ?

ઉકેલ 100 ઈંચ ટેલિસ્કોપનો અર્થ એ કે $2a$ = 100 ઈંચ = 254 cm.

આમ, જો $\lambda \approx 6000$ Å $= 6 \times 10^{-5}$ cm હોય

તો

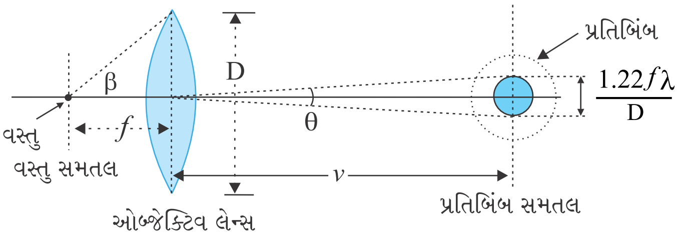
$$\Delta\theta \approx \frac{0.61 \times 6 \times 10^{-5}}{127} \approx 2.9 \times 10^{-7} \text{ રેડીયન}$$

ઉદાહરણ 10.6

આપણે આવો જ તર્ક માઈક્રોસ્કોપના ઓબ્જેક્ટિવને પણ લાગુ પાડી શકીએ. આ કિસ્સામાં, વસ્તુને f થી થોડેક દૂર મૂકવામાં આવે છે કે જેથી v જેટલા અંતરે વાસ્તવિક પ્રતિબિંબ રચાય (આકૃતિ 10.20). મોટવણી–પ્રતિબિંબના પરિમાણ અને વસ્તુના પરિમાણનો ગુણોત્તર એ $m \approx v/f$ વડે અપાય છે. આકૃતિ 10.20 પરથી જોઈ શકાય છે કે

$D/f \approx 2 \tan\beta$ (10.26)

જ્યાં, 2β એ ઓબ્જેક્ટીવના વ્યાસ વડે માઈક્રોસ્કોપના કેન્દ્ર પાસે બનેલો કોણ છે.



આકૃતિ 10.20 માઈક્રોસ્કોપના ઓબ્જેક્ટિવ વડે રચાતું વાસ્તવિક પ્રતિબિંબ.

તમારી આંખની વિભેદન શક્તિ શોધો

તમે તમારી આંખની વિભેદન શક્તિ એક સરળ પ્રયોગ દ્વારા શોધી શકો છો. એક સરખી પહોળાઈ ધરાવતી અને સફેદ પટ્ટીઓથી છૂટી પાડતી કાળી પટ્ટીઓ બનાવો, નીચે આકૃતિ જુઓ. બધી જ કાળી પટ્ટીઓ સરખી પહોળાઈની હોવી જોઈએ, જ્યારે વચ્ચે વચ્ચેની સફેદ પટ્ટીઓની જાડાઈ તમે ડાબેથી જમણે જાઓ તેમ વધતી જતી હોવી જોઈએ. ઉદાહરણ તરીકે, ધારો કે બધી કાળી પટ્ટીઓની જાડાઈ 5 mm છે. ધારોકે પ્રથમ બે સફેદ પટ્ટીઓની જાડાઈ 0.5 mm છે, પછીની બે સફેદ પટ્ટીઓની જાડાઈ 1 mm, પછીની બે દરેક 1.5 mmની વગેરે. આ ભાતને ઓરડાની કે લેબોરેટરીની દિવાલ પર તમારી આંખની ઊંચાઈએ ચોંટાડો.

હવે આ ભાતને, બને તો એક આંખથી જુઓ. હવે દિવાલથી દૂર અથવા નજીક ખસીને એવું સ્થાન નક્કી કરો કે જેમાં કોઈક બે કાળી પટ્ટીઓ એકબીજાથી છૂટી પટ્ટીઓ તરીકે દેખાય. આ કાળી પટ્ટીઓની ડાબીબાજુ આવેલી બધી જ કાળીપટ્ટીઓ એકબીજામાં ભળી ગયેલી દેખાશે અને તેમને છૂટી જોઈ શકાશે નહીં. તેનાથી વિરુદ્ધ, જમણીબાજુ આવેલી પટ્ટીઓ વધારેને વધારે સ્પષ્ટતાથી જોઈ શકાશે. સફેદ પટ્ટી કે જે બે વિભાગને છૂટી પાડે છે તેની પહોળાઈ d નોંધો, અને તમારી આંખથી દીવાલ સુધીનું અંતર D માપો. તો d/D તમારી આંખની વિભેદન (શક્તિ) છે.

તમે બારીમાંથી દાખલ થતાં સૂર્યપ્રકાશની હાજરીમાં હવામાં તરતા ધુળના રજકણો જોયા હશે. જે રજકણને તમે સ્પષ્ટ જોઈ શકો અને બીજા રજકણથી અલગ જોઈ શકો તે રજકણનું તમારાથી અંતર શોધો. તમારી આંખની વિભેદનશક્તિ અને ધૂળના રજકણનું અંતર જાણતા હોવાથી, ધૂળના તે રજકણનું, માપ (Size) નક્કી કરો.

માઈક્રોસ્કોપ હેઠળ મૂકેલ નમૂનાના બે બિંદુઓ વચ્ચેનું અંતર જ્યારે પ્રકાશની તરંગલંબાઈ λ સાથે સરખાવી શકાય તેવું થાય ત્યારે વિવર્તન અસરો અગત્યની બની જાય છે. એક બિંદુવત્ વસ્તુનું પ્રતિબિંબ ફરીવાર, એક વિવર્તન ભાત હશે કે જેનું પ્રતિબિંબ સમતલ (Image Plane)માં માપ નીચે મુજબ આપી શકાય.

$$\upsilon\theta = \upsilon\left(\frac{1.22\,\lambda}{\mathrm{D}}\right) \qquad (10.27)$$

બે વસ્તુઓ કે જેમના પ્રતિબિંબો આ અંતર કરતા ઓછા અંતરે હોય તેમને છૂટા જોઈ શકાશે નહીં, તેઓ એક તરીકે દેખાશે. વસ્તુસમતલ (Object Plane)માં આને અનુરૂપ લઘુત્તમ અંતર નીચે મુજબ આપી શકાય.

$$d_{\min} = \left[\upsilon\left(\frac{1.22\,\lambda}{\mathrm{D}}\right)\right] / m$$

$$= \frac{1.22\lambda}{\mathrm{D}}\,\frac{\upsilon}{m}$$

અથવા $\mathrm{m} = \dfrac{\upsilon}{f}$ હોવાથી

$$d_{\min} = \frac{1.22\, f\lambda}{\mathrm{D}} \qquad (10.28)$$

હવે, સમીકરણો (10.26) અને (10.28) પરથી,

$$d_{\min} = \frac{1.22\lambda}{2\tan\beta}$$

$$\simeq \frac{1.22\lambda}{2\sin\beta} \qquad (10.29)$$

જો વસ્તુ અને ઓબ્જેક્ટિવ લેન્સ વચ્ચેનું માધ્યમ હવા ના હોય પરંતુ n વક્રીભવનાંક ધરાવતું માધ્યમ હોય તો, સમીકરણ (10.29) નીચે મુજબ બદલાશે.

$$d_{\min} = \frac{1.22\lambda}{2n\sin\beta} \qquad (10.30)$$

$n \sin \beta$ એ ગુણાકારને *સંખ્યાત્મક દર્પણમુખ* (*Numerical Aperture*) કહે છે અને તે ઘણી વખત ઓબ્જેક્ટીવ પર લખેલ હોય છે.

માઈક્રોસ્કોપની વિભેદનશક્તિ એ બે બિંદુઓ જુદાજુદા દેખાય તે માટેના લઘુત્તમ અંતરના વ્યસ્ત તરીકે આપવામાં આવી છે. સમીકરણ (10.30) પરથી જોઈ શકાય છે કે વધારે વક્રીભવનાંક ધરાવતા માધ્યમની પસંદગીથી વિભેદનશક્તિ વધારી શકાય છે. સામાન્ય રીતે ઓબ્જેક્ટિવ કાચની નજીકનો વક્રીભવનાંક ધરાવતા તેલનો ઉપયોગ કરવામાં આવે છે. આવી રચનાને ઑઈલ ઇમર્સન ઑબ્જેક્ટીવ (*Oil Immersion Objective*) કહેવામાં આવે છે. અત્રે એ નોંધો કે $\sin \beta$નું મૂલ્ય એકથી વધારી શકાતું નથી. આમ, આપણે જોઈ શકીએ છીએ કે માઈક્રોસ્કોપની વિભેદનશક્તિ મૂળભૂત રીતે વપરાતા પ્રકાશની તરંગલંબાઈ દ્વારા નક્કી થાય છે.

એક શક્યતા એવી છે કે તમને કદાચ વિભેદન અને મોટવણી અને તે જ રીતે આ પ્રાચલો સાથે કામ લેવાની બાબતમાં ટેલિસ્કોપ અને માઈક્રોસ્કોપના કાર્ય અંગે ગૂંચવાડો થઈ શકે છે. ટેલિસ્કોપ દૂરની વસ્તુઓનાં આંખની નજીક પ્રતિબિંબ રચે છે. તેથી, જે વસ્તુઓ દૂર હોવાથી છૂટી જોઈ શકાતી નથી તેને ટેલિસ્કોપમાંથી જોવાથી છૂટી જોઈ શકાય છે. તેનાથી વિરુદ્ધ, માઈક્રોસ્કોપ વસ્તુઓને વિવર્ધિત (મોટી) કરી (કે જે આપણાથી નજીક છે) તેના મોટા પ્રતિબિંબ રચે છે. આપણે બે તારાઓ કે દૂરના ગ્રહના બે ઉપગ્રહો જોઈ રહ્યા છીએ અથવા આપણે જીવીત કોષના જુદા-જુદા ભાગ નિહાળી રહ્યા છીએ. આ સંદર્ભમાં, એ યાદ રાખવું સારું રહેશે કે ટેલિસ્કોપ વિભેદન કરે છે જ્યારે માઈક્રોસ્કોપ પ્રતિબિંબને મોટું કરે છે.

10.6.4 કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર કેટલે સુધી લાગુ પાડી શકાય (The Validity of Ray Optics)

એક a માપના અડચણ (એટલે કે, સ્લિટ અથવા છિદ્ર)ને સમાંતર કિરણપૂંજ વડે પ્રકાશિત કરવામાં આવતાં તે લગભગ $\approx \lambda/a$ જેટલા કોણે વિવર્તિત પ્રકાશ મોકલે છે. આ તેજસ્વી મધ્યસ્થ અધિક્તમની કોણીય પહોળાઈ છે. આથી, વિવર્તનના કારણે z જેટલું અંતર કાપતાં વિવર્તિત કિરણપૂંજ $z\lambda/a$ જેટલી પહોળાઈ ધારણ કરશે. એવું પૂછવું રસપ્રદ બનશે કે zના કયા મૂલ્ય માટે વિવર્તનને કારણે કિરણપૂંજનો થતો ફેલાવો અડચણના માપ a સાથે સરખાવી શકાય તેટલો થશે. આમ, આપણે $z\lambda/a$ને aના લગભગ બરાબર તરીકે લઈ શકીએ. આ એવું અંતર આપશે કે જેનાથી આગળ a પહોળાઈ ધરાવતા કિરણપૂંજમાં થતો ફેલાવો અગત્યનો બની રહેશે. તેથી

$$z \approx \frac{a^2}{\lambda} \qquad (10.31)$$

આપણે નીચેના સમીકરણથી વ્યાખ્યાયિત કરાતી રાશિને *ફ્રેનલ લંબાઈ* z_F કહીશું.

$$z_F \approx a^2/\lambda$$

સમીકરણ (10.31) દર્શાવે છે કે z_Fથી ખૂબ જ ઓછા અંતર માટે વિવર્તનને કારણે થતો ફેલાવો એ કિરણપૂંજની જાડાઈ કરતા ઓછો હોય છે. જ્યારે અંતર લગભગ z_F જેટલું થશે ત્યારે તે સરખાવી શકાય તેવું થશે. z_Fથી ખૂબ મોટા અંતર માટે વિવર્તનને કારણે થતો ફેલાવો કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર (એટલે કે

અડચણની પહોળાઈ a)થી થતા ફેલાવા પર પ્રભાવી છે. સમીકરણ (10.31) એ પણ દર્શાવે છે કે કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર તરંગલંબાઈના શૂન્ય તરફના લક્ષ માટે સાચું છે.

ઉદાહરણ 10.7

ઉદાહરણ 10.7 જ્યારે અડચણની પહોળાઈ 3 mm હોય અને તરંગલંબાઈ 500 nm હોય તો કયા અંતર માટે કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર એક સારી સંનિકટતા હશે ?

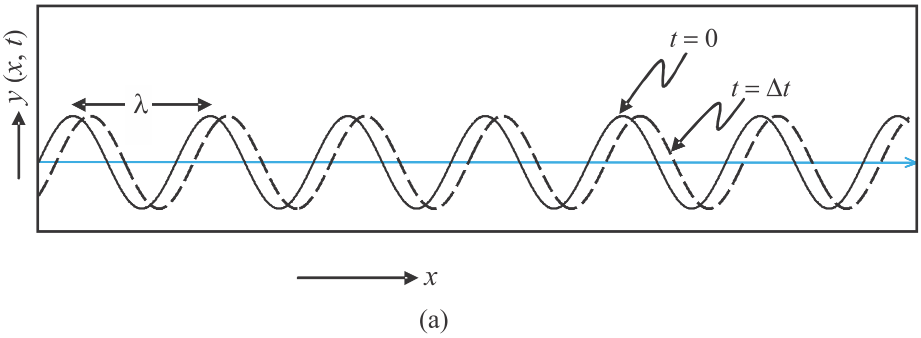
ઉકેલ

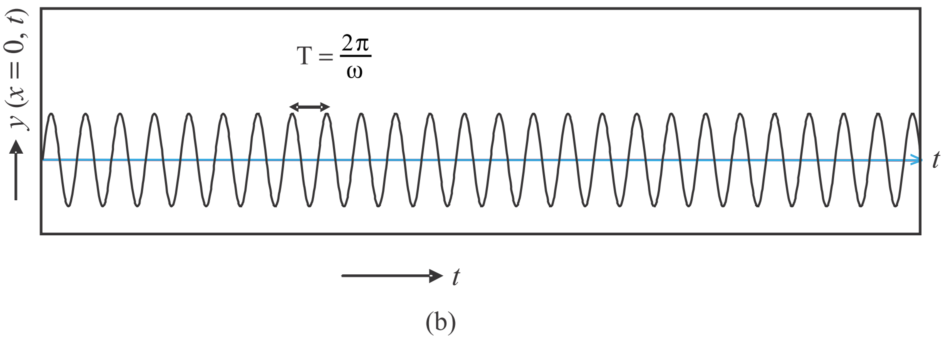
$$z_F = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{(3 \times 10^{-3})^2}{(5 \times 10)^{-7}} = 18\,\text{m}$$

આ ઉદાહરણ દર્શાવે છે કે જ્યારે તરંગો ઘણા મીટર લાંબા હોય ત્યારે નાના અડચણ માટે પણ વિવર્તનને કારણે થતો ફેલાવો અવગણી શકાય. આમ, ઘણી સામાન્ય પરિસ્થિતિઓમાં કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર લાગુ પાડી શકાય છે.

10.7 ધ્રુવીભવન (POLARISATION)

જેનો બીજો છેડો જડિત હોય તેવી એક લાંબી દોરીને સમક્ષિતિજ રહે તેમ પકડેલી ધારો. જો આપણે દોરીનાં છેડાને ઉપર-નીચે આવર્ત રીતે ગતિ કરાવીએ, તો આપણે $+x$ દિશામાં ગતિ કરતું તરંગ ઉત્પન્ન કરીશું (આકૃતિ 10.21). આવા તરંગને નીચેના સમીકરણ વડે દર્શાવી શકાય.





આકૃતિ 10.21 (a) જ્યારે જ્યાવર્તી (Sinusoidal) તરંગ $+x$-દિશામાં પ્રસરતું હોય ત્યારે વક્રો અનુક્રમે, $t = 0$ અને $t = \Delta t$ સમયે, દોરીના સ્થાનાંતર રજૂ કરે છે. (b) વક્ર જ્યારે જ્યાવર્તી (Sinusoidal) તરંગ $+x$-દિશામાં ગતિ કરતું હોય ત્યારે $x = 0$ સ્થાને, સ્થાનાંતરનો સમય સાથેનો ફેરફાર દર્શાવે છે. $x = \Delta x$ આગળ સ્થાનાંતરનો સમય સાથેનો ફેરફાર થોડોક જમણીબાજુ ખસી ગયેલો હશે.

$$y(x,t) = a\sin(kx - \omega t) \tag{10.32}$$

જ્યાં, a અને ω ($= 2\pi\nu$) એ અનુક્રમે તરંગનો કંપવિસ્તાર અને કોણીય આવૃત્તિ રજૂ કરે છે. વધારામાં,

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \tag{10.33}$$

એ તરંગ સાથે સંકળાયેલ તરંગલંબાઈ છે. આપણે આવા તરંગોનાં પ્રસરણની ધોરણ XIના પાઠ્યપુસ્તકના પ્રકરણ-15માં ચર્ચા કરેલી હતી. હવે સ્થાનાંતર (કે જે y-દિશામાં છે) એ તરંગ પ્રસરણ દિશાને લંબ હોવાને કારણે, આપણને *લંબગત તરંગ* મળે છે. વળી, સ્થાનાંતર y-દિશામાં હોવાથી તેને ઘણી વખત y-ધ્રુવીભૂત તરંગ કહે છે. દોરી પરનું દરેક બિંદુ સુરેખા પર ગતિ કરે છે. તેથી આ તરંગ પણ રેખીય ધ્રુવીભૂત (Linearly Polarized) તરંગ તરીકે ઓળખાય છે. વધારામાં, દોરી હંમેશા $x - y$ સમતલમાં જ રહેતી હોવાથી તેને *તલ ધ્રુવીભૂત* (*Plane Polarized*) *તરંગ* તરીકે પણ ઓળખવામાં આવે છે.

આ જ રીતે આપણે $x - z$ સમતલમાં પણ દોરીનાં દોલનો વિચારી શકીએ, જે z-ધ્રુવીભૂત તરંગ ઉત્પન્ન કરે, જેનું સ્થાનાંતર નીચેના સમીકરણ વડે આપી શકાય.

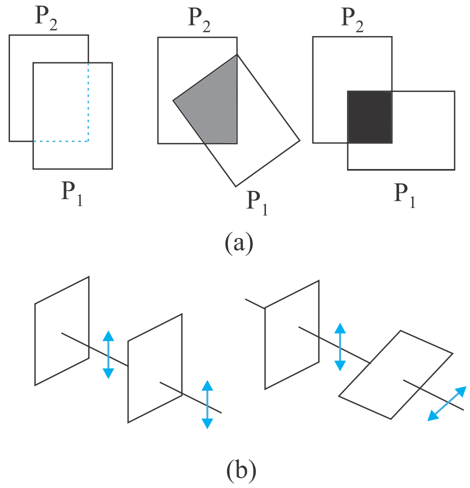
$$z(x,t) = a\sin(kx - \omega t) \tag{10.34}$$

અત્રે, એ નોંધવું રહ્યું કે [સમીકરણો (10.32) અને (10.34) દ્વારા રજુ થયેલ] રેખીય ધ્રુવીભૂત તરંગો એ બધા જ લંબગત તરંગો છે; એટલેકે દોરીના દરેક બિંદુનું સ્થાનાંતર એ હંમેશા તરંગ પ્રસરણ દિશાને લંબ હોય છે. અંતમાં, જો દોલનો કરતું સમતલ સમયના ટૂંકાગાળામાં અસ્તવ્યસ્ત રીતે બદલવામાં આવે તો આપણને *અધ્રુવીભૂત તરંગ* મળે છે. આમ, અધ્રુવીભૂત તરંગ માટે સમય સાથે સ્થાનાંતર અસ્તવ્યસ્ત રીતે બદલાયા કરે છે, અલબત્ત તે પ્રસરણ દિશાને તો હંમેશાં લંબ જ હશે.

પ્રકાશ તરંગો સ્વભાવે લંબગત છે; એટલેકે પ્રકાશના પ્રસરણ સાથે સંકળાયેલ વિદ્યુતક્ષેત્ર એ હંમેશા તરંગની પ્રસરણ દિશાને લંબ હોય છે. આ (હકીકત) એક સાદા પોલેરૉઈડ (Polaroid)ની મદદથી સરળતાથી દર્શાવી શકાય. તમે પાતળી પ્લાસ્ટીક જેવી પરત (Sheet) જોઈ હશે, જેને *પોલેરૉઈડ* કહે છે. પોલેરૉઈડ એ લાંબી સાંકળ ધરાવતા અણુઓના બનેલા હોય છે, જેઓ કોઈ ચોક્કસ દિશામાં ગોઠવાયેલા હોય છે. આવા (ચોક્કસ રીતે) ગોઠવાયેલા અણુઓની દિશામાં રહેલા (પ્રસરતા પ્રકાશ તરંગ સાથે સંકળાયેલા) વિદ્યુત સદિશોનું શોષણ થાય છે. આમ, જો અધ્રુવીભૂત પ્રકાશ તરંગ આવા પોલેરૉઈડ ઉપર આપાત થાય તો પ્રકાશ તરંગ રેખીય ધ્રુવીભૂત બને છે. જેમાં વિદ્યુત સદિશો ગોઠવાયેલા અણુઓને લંબદિશામાં દોલનો કરે છે; આ દિશાને પોલેરૉઈડની *દગ્-અક્ષ* (*Pass-axis*) કહે છે.

આમ, જો કોઈ સામાન્ય ઉદ્‌ગમ (જેવાકે સોડીયમ લૅમ્પ)માંથી નીકળતો પ્રકાશ પોલેરૉઈડ તક્તિ P_1માંથી પસાર થતો હોય ત્યારે એવું જોવામાં આવ્યું છે કે તેની તીવ્રતા ઘટીને અડધી થઈ જાય છે. P_1ને ભ્રમણ આપતાં નિર્ગમન પામતા કિરણપૂંજ ઉપર કોઈ અસર થતી નથી અને નિર્ગમિત તીવ્રતા અચળ રહે છે. હવે, ધારોકે આના જેવો જ બીજો પોલેરૉઈડ P_2 ને P_1ની અગાઉ મૂકવામાં આવે છે. આમ, અપેક્ષા મુજબ બલ્બમાંથી આવતા પ્રકાશની તીવ્રતામાં એકલા P_2માંથી પસાર થવાને કારણે ઘટાડો થાય છે. પરંતુ, હવે P_1ને ભ્રમણ આપવાથી, P_1માંથી બહાર આવતા પ્રકાશમાં નાટ્યાત્મક ફેરફાર જોવા મળે

છે. એક સ્થિતિમાં, P_2 માંથી નિર્ગમન પામતી તીવ્રતા તેના પછી રાખેલા P_1માંથી બહાર આવતાં લગભગ શૂન્ય થાય છે. જ્યારે તેને આ સ્થિતિમાંથી 90° એ ફેરવવામાં આવે છે ત્યારે P_2માંથી બહાર નીકળતી બધી જ તીવ્રતા P_1 દ્વારા નિર્ગમન પામે છે (આકૃતિ 10.22).



આકૃતિ 10.22 (a) P_2 અને P_1 બે પોલેરૉઈડમાંથી પ્રકાશ પસાર થાય છે. તેમની વચ્ચેના કોણને 0°થી 90°ની વચ્ચે ફેરવતા, નિર્ગમન પામતી આંશિક (Fraction) તીવ્રતામાં 1થી 0 જેટલો ઘટાડો થાય છે. અત્રે, નોંધો કે એક જ પોલેરૉઈડ P_1માંથી જોયેલ પ્રકાશ ખૂણા સાથે બદલાતો નથી. (b) જ્યારે પ્રકાશ બે પોલેરૉઈડમાંથી પસાર થાય છે ત્યારે વિદ્યુત સદિશની વર્તણૂક. નિર્ગમન પામતો ધ્રુવીભૂત (પ્રકાશ) એ પોલેરૉઈડ અક્ષને સમાંતર ઘટક છે. બે-દિશ તીર એ દોલન કરતો વિદ્યુત સદિશ દર્શાવે છે.

જો એવું ધારીએ કે પોલેરૉઈડ P_2માંથી પસાર થતો પ્રકાશ P_2ની દગ્-અક્ષને સમાંતર ધ્રુવીભૂત થાય છે તો ઉપરનો પ્રયોગ સહેલાઈથી સમજી શકાય. જો P_2ની દગ્-અક્ષ એ P_1ની દગ્-અક્ષ સાથે θ કોણ બનાવતી હોય તો જ્યારે ધ્રુવીભૂત કિરણપૂંજ પોલેરૉઈડ P_2માંથી પસાર થાય ત્યારે $E\cos\theta$ ઘટક (P_2ની દગ્-અક્ષને સમાંતર) P_2માંથી પસાર થશે. આમ, આપણે પોલેરૉઈડ P_1 (અથવા P_2)ને ભ્રમણ આપીએ તેમ તીવ્રતા નીચેના સૂત્ર પ્રમાણે બદલાશે.

$$I = I_0 \cos^2\theta \qquad (10.35)$$

જ્યાં, I_0 એ P_1માંથી પસાર થયા બાદ ધ્રુવીભૂત પ્રકાશની તીવ્રતા છે. જેને *માલસનો નિયમ* કહે છે. ઉપરોક્ત ચર્ચા દર્શાવે છે કે એક પોલેરૉઈડમાંથી પારગમન પામતી તીવ્રતા એ આપાત તીવ્રતાની અડધી હોય છે. બીજો પોલેરૉઈડ મૂકવાથી અને બે પોલરૉઈડની દગ્-અક્ષો વચ્ચેના ખૂણાને ગોઠવીને તીવ્રતાને 50 %થી શૂન્યની વચ્ચે ફરીવાર નિયંત્રિત કરી શકાય છે.

પોલેરૉઈડનો ઉપયોગ ગોગલ્સ, બારીના કાચ વગેરેમાં તીવ્રતાના નિયંત્રણ માટે કરવામાં આવે છે. પોલેરૉઈડનો ઉપયોગ ફોટોગ્રાફિક કેમેરામાં અને 3 D મૂવી કેમેરામાં પણ થાય છે.

ઉદાહરણ 10.8

ઉદાહરણ 10.8 જ્યારે એક પોલેરૉઈડ તક્તિને એકબીજાને લંબ રાખેલ (Crossed) બીજી બે પોલેરૉઈડની વચ્ચે રાખી ભ્રમણ આપવામાં આવે છે ત્યારે નિર્ગમન પામતા પ્રકાશની તીવ્રતાની ચર્ચા કરો.

ઉકેલ ધારોકે પ્રથમ પોલેરાઈઝર P_1માંથી પસાર થયા બાદ નીકળતા ધ્રુવીભૂત પ્રકાશની તીવ્રતા I_0 છે. ત્યારબાદ બીજા પોલેરાઈઝર P_2માંથી પસાર થયા બાદ પ્રકાશની તીવ્રતા નીચે મુજબ થશે.

$$I = I_0 \cos^2\theta$$

જ્યાં, θ એ P_1 અને P_2ની દગ્-અક્ષો વચ્ચેનો કોણ છે. અત્રે, P_1 અને P_3 એકબીજાને લંબ હોવાથી P_2 અને P_3ની દગ્-અક્ષો વચ્ચેનો ખૂણો $(\pi/2 - \theta)$ થશે. તેથી P_3માંથી નિર્ગમન પામતા પ્રકાશની તીવ્રતા

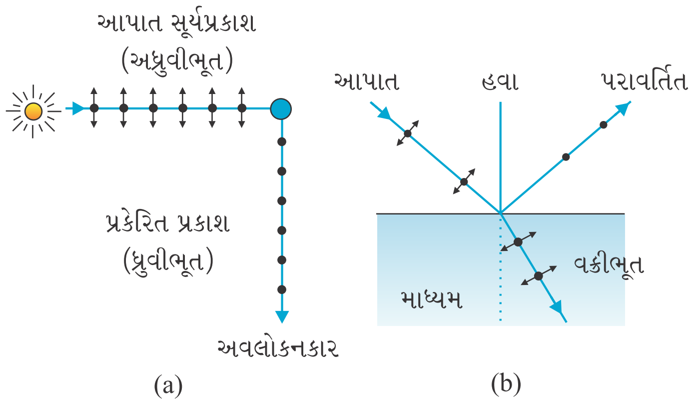
$$I = I_0 \cos^2\theta \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$
$$= I_0 \cos^2\theta \sin^2\theta = (I_0/4)\sin^2 2\theta \text{ થશે.}$$

તેથી, જ્યારે $\theta = \pi/4$ હશે ત્યારે નિર્ગમન પામતા (પ્રકાશની) તીવ્રતા મહત્તમ હશે.

ઉદાહરણ 10.8

10.7.1 પ્રકીર્ણન દ્વારા ધ્રુવીભવન (Polarisation by Scattering)

જ્યારે ભ્રમણ કરાવતા પોલેરૉઈડમાંથી આકાશના ચોખ્ખા બ્લ્યુ ભાગમાંથી આવતા પ્રકાશને જોવામાં આવે છે ત્યારે આપણને તીવ્રતામાં વધારો અને ઘટાડો જોવા મળે છે. આ બીજું કશું જ નથી પણ પૃથ્વીના વાતાવરણમાં રહેતા અણુઓ સાથેની અથડામણને કારણે દિશા બદલતો (પ્રકીર્ણન પામવાને કારણે) સૂર્યપ્રકાશ જ છે. આકૃતિ 10.23(a) દર્શાવે છે કે, આપાત સૂર્યપ્રકાશએ અધ્રુવીભૂત છે. ટપકાં એ આકૃતિના સમતલને લંબધ્રુવીભવન સૂચવે છે. બે-દિશ તીર એ આકૃતિના સમતલમાં ધ્રુવીભવન દર્શાવે છે. (વચ્ચે અધ્રુવીભૂત પ્રકાશમાં આ બે વચ્ચે કળા-સંબંધ હોતો નથી). આપાત તરંગના વિદ્યુતક્ષેત્રની અસર હેઠળ અણુઓમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રૉન આ બંને દિશામાં ઘટકો ધરાવતી ગતિ ધારણ કરે છે. આપણે સૂર્યની દિશાને 90° એ જોતો અવલોકનકાર દોર્યો છે. હવે એ સ્પષ્ટ જ છે કે બે-દિશ તીરને સમાંતર પ્રવેગિત થતા વિદ્યુતભારો આ અવલોકનકાર તરફ ઊર્જાનું ઉત્સર્જન કરશે નહીં, કારણ કે તેમના પ્રવેગને લંબ ઘટક હોતો નથી. તેથી અણુઓ દ્વારા પ્રકેરિત થતા વિકિરણને ટપકાં વડે દર્શાવેલ છે. તે આકૃતિના સમતલને લંબ દિશામાં ધ્રુવીભૂત છે. આ આકાશમાં પ્રકાશના પ્રકીર્ણનથી થતા ધ્રુવીભવનને સમજાવે છે.

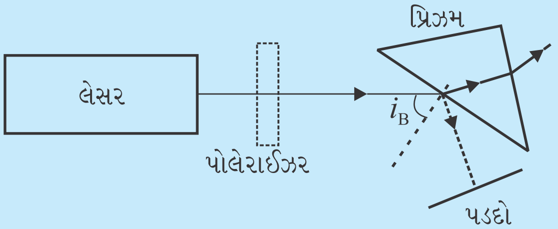


આકૃતિ 10.23 (a) અવકાશનાં વાદળી પ્રકેરિત પ્રકાશનું ધ્રુવીભવન. આપાત સૂર્યપ્રકાશ અધ્રુવીભૂત છે (ટપકાં અને તીર). એક નમૂનારૂપ અણુ દર્શાવેલ છે. પુસ્તકના પાનને લંબ દિશામાં ધ્રુવીભૂત થયેલા પ્રકાશને તો 90° એ પ્રકેરિત કરે છે. (ફક્ત ટપકાં). (b) બ્રુસ્ટર કોણે પારદર્શક માધ્યમથી પરાવર્તિત પ્રકાશનું ધ્રુવીભવન (પરાવર્તિત કિરણ એ વક્રીભૂત કિરણને લંબ છે).

1920ના ગાળામાં કોલકાતામાં સી. વી. રામન (C. V. Raman) અને તેમના સહકાર્યકરો (Collaborators) એ અણુઓ દ્વારા પ્રકાશના પ્રકીર્ણનનો ખૂબ ઊંડાણપૂર્વક અભ્યાસ કર્યો હતો. તેમના આ કાર્ય માટે, 1930માં રામનને ભૌતિકવિજ્ઞાનના નૉબેલ પુરસ્કારથી નવાજવામાં આવ્યા હતાં.

પૂર્ણ પારગમનનો એક ખાસ કિસ્સો

જ્યારે પ્રકાશ બે માધ્યમોની આંતર સપાટી પર આપાત થાય છે ત્યારે એવું જોવામાં આવ્યું છે કે તેનો કેટલોક ભાગ પરાવર્તન પામે છે અને અમુક ભાગનું પારગમન થાય છે. આને સંબંધિત સવાલ વિચારો : *શું એવું શક્ય છે કે અમુક શરતોને આધિન સપાટી (કે જે સામાન્ય રીતે પરાવર્તક છે) પર આપાત એકરંગી પ્રકાશ કિરણપૂંજનું પરાવર્તન કર્યા સિવાય સંપૂર્ણ પારગમન થાય ? તમારા આશ્ચર્ય વચ્ચે, આનો જવાબ છે, હા.*



એક સરળ પ્રયોગ ધ્યાનમાં લો અને શું થાય છે તે ચકાસો. લેસર, સારી ગુણવત્તા વાળો પોલેરાઈઝર, એક પ્રિઝમ અને પડદાને અહીં દર્શાવેલ આકૃતિ મુજબ ગોઠવો.

ધારોકે લેસર ઉદ્‌ગમમાંથી ઉત્સર્જિત પ્રકાશ પોલેરાઈઝરમાંથી પસાર થાય છે અને પ્રિઝમની સપાટી ઉપર બ્રુસ્ટર આપાત કોણ i_B એ આપાત થાય છે. હવે, પોલેરાઈઝરને કાળજીપૂર્વક ભ્રમણ કરાવો અને તમે જોશો કે પોલેરાઈઝરની કોઈ ચોક્કસ ગોઠવણ માટે પ્રિઝમ ઉપર આપાત પ્રકાશનું સંપૂર્ણ પણે પારગમન થાય છે અને પ્રિઝમની સપાટી પરથી કોઈ પ્રકાશનું પરાવર્તન થતું નથી. પરાવર્તિત ટપકું સંપૂર્ણપણે નાબુદ થાય છે.

10.7.2 પરાવર્તનથી ધ્રુવીભવન (Polarisation by Reflection)

આકૃતિ 10.23(b) દર્શાવે છે કે પારદર્શક માધ્યમ, ધારો કે પાણી, પરથી પ્રકાશનું પરાવર્તન થાય છે. અગાઉ જોયું તેમ, ટપકાં અને તીર સૂચવે છે કે આપાત અને વક્રીભૂત તરંગોમાં બંને પ્રકારના ધ્રુવીભવન હાજર છે. આપણે એક એવી સ્થિતિ દોરી છે કે જેમાં પરાવર્તિત તરંગ એ વક્રીભૂત તરંગને લંબરૂપે ગતિ કરતું હોય. પાણીમાં દોલન કરતા ઈલેક્ટ્રૉન પરાવર્તિત તરંગ ઉત્પન્ન કરે છે. આ (બંને) માધ્યમમાં તરંગ વિકિરણ; એટલે કે *વક્રીભૂત તરંગ*, ને લંબદિશામાં ગતિ કરે છે. આકૃતિમાં દર્શાવેલ તીરો *પરાવર્તિત તરંગ*ને સમાંતર છે. આ દિશાની ગતિ એ પરાવર્તિત તરંગમાં ફાળો આપતી નથી. તેથી આકૃતિ દર્શાવે છે તેમ, પરાવર્તિત પ્રકાશ એ આકૃતિના સમતલને લંબ દિશામાં રેખીય ધ્રુવીભૂત હશે (ટપકાં વડે દર્શાવેલ છે). આની ચકાસણી પરાવર્તિત પ્રકાશને એનેલાઈઝર (વિશ્લેષક)માંથી જોઈને કરી શકાય. જ્યારે એનેલાઈઝરની અક્ષ એ આકૃતિના સમતલમાં, એટલે કે આપાત સમતલમાં, હશે તે વખતે પારગમન પામતી તીવ્રતા શૂન્ય હશે.

જ્યારે અધ્રુવીભૂત પ્રકાશ બે પારદર્શક માધ્યમોને છૂટી પાડતી સીમા (સપાટી) ઉપર આપાત થાય છે, ત્યારે પરાવર્તિત પ્રકાશ ધ્રુવીભૂત બને છે, જેમાં વક્રીભૂત અને પરાવર્તિત કિરણ એકબીજાને લંબ હોય તેવી સ્થિતિમાં વિદ્યુત સદિશ એ આપાત સમતલને લંબ હશે. આમ, આપણે જોયું કે જ્યારે પરાવર્તિત કિરણ વક્રીભૂત કિરણને લંબ હોય છે ત્યારે પરાવર્તિત તરંગ એ સંપૂર્ણ ધ્રુવીભૂત તરંગ બને છે. આ કિસ્સામાં આપાતકોણને *બ્રુસ્ટર કોણ* કહે છે અને તેને i_B વડે દર્શાવવામાં આવે છે. આપણે જોઈ શકીએ છીએ કે i_B એ ઘટ્ટ માધ્યમના વક્રીભવનાંક સાથે સંકળાયેલ છે. હવે, $i_B + r = \pi/2$ હોવાથી, આપણને સ્નેલના નિયમ પરથી નીચે મુજબ મળશે.

$$\mu = \frac{\sin i_B}{\sin r} = \frac{\sin i_B}{\sin(\pi/2 - i_B)}$$

$$= \frac{\sin i_B}{\cos i_B} = \tan i_B \qquad (10.36)$$

જેને *બ્રુસ્ટરનો નિયમ* કહે છે.

ઉદાહરણ 10.9 અધ્રુવીભૂત પ્રકાશ એક સમતલ કાચની સપાટી પર આપાત થાય છે. પરાવર્તિત અને વક્રીભૂત કિરણો એકબીજાને લંબ થાય તે માટે કેટલો આપાતકોણ હશે ?

ઉકેલ $i + r$ એ $\pi/2$ બરાબર થાય તે માટે, આપણે $\tan i_B = \mu = 1.5$ જોઈશે. જે $i_B = 57^o$ આપશે. આ હવા અને કાચ આંતરપૃષ્ઠ માટેનો બ્રુસ્ટર કોણ થશે.

ઉદાહરણ 10.9

સરળતા ખાતર, આપણે પ્રકાશના 90° એ થતા પ્રકીર્ણનની અને બ્રુસ્ટર કોણે થતા પરાવર્તનની ચર્ચા કરી. આ ખાસ પરિસ્થિતિમાં, વિદ્યુતક્ષેત્રના બેમાંથી એક લંબ ઘટક શૂન્ય હોય છે. બીજા કોઈ ખૂણે, બંને ઘટકો હાજર હોય છે પરંતુ તેમાંથી એક ઘટક બીજાની સરખામણીમાં પ્રબળ હોય છે. આ બે લંબ ઘટકો વચ્ચે કોઈ સ્થાયી કળા સંબંધ નથી હોતો, કારણકે આ બંને અધ્રુવીભૂત કિરણપૂંજના બે લંબ ઘટકોમાંથી મેળવેલા છે. જ્યારે આવા પ્રકાશને ભ્રમણ કરતા એનેલાઈઝર (પોલરોઈડ) માંથી જોવામાં આવે છે તો આપણને તીવ્રતામાં મહત્તમ અને ન્યૂનતમ દેખાય છે, પરંતુ તે સંપૂર્ણ અપ્રકાશિત દેખાતી નથી. આવા પ્રકારના પ્રકાશને *અંશતઃ ધ્રુવીભૂત* કહે છે.

ચાલો, આ પરિસ્થિતિને સમજવાનો પ્રયત્ન કરીએ. જ્યારે અધ્રુવીભૂત પ્રકાશ કિરણપૂંજ બે માધ્યમોને છૂટી પાડતી સપાટી પર બ્રુસ્ટર કોણે આપાત થાય ત્યારે ફક્ત જેના વિદ્યુતક્ષેત્ર સદિશ એ આપાત સમતલને લંબ હોય તેટલો જ પ્રકાશનો ભાગ પરાવર્તિત થાય છે. હવે, સારી ગુણવત્તાના પોલેરાઈઝરની મદદથી જો આપણે, જેનો વિદ્યુતક્ષેત્ર સદિશ આપાત સમતલને લંબ હોય તેવા બધા જ પ્રકાશને દૂર કરી દઈએ અને આવા પ્રકાશને પ્રિઝમની સપાટી પર બ્રુસ્ટર કોણે આપાત કરાવીએ તો તમે કોઈ પણ પ્રકારનું પરાવર્તન નહીં જુઓ અને પ્રકાશનું સંપૂર્ણ પારગમન થશે.

આપણે આ પ્રકરણની શરૂઆત એ વાત નોંધીને કરી કે કેટલીક ઘટનાઓ એવી છે જે ફક્ત તરંગવાદથી જ સમજાવી શકાય છે. યોગ્ય સમજણ મેળવવા માટે સૌપ્રથમ આપણે પરાવર્તન અને વક્રીભવન જેવી ઘટનાઓની ચર્ચા તરંગ પ્રકાશશાસ્ત્રના આધારે કરી કે જે પ્રકરણ-9માં કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્રના આધારે ભણ્યા હતા. ત્યારબાદ, આપણે યંગના બે-સ્લિટનાં પ્રયોગની ચર્ચા કરી કે જે પ્રકાશશાસ્ત્રના અભ્યાસમાં નિર્ણયાત્મક (Turning Point) સાબિત થઈ. અંતમાં આની સાથે સંકળાયેલા મુદ્દાઓ જેવાકે વિવર્તન, વિભેદન, ધ્રુવીભવન અને કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્રની માન્યતાની ચર્ચા કરી. હવે પછીના પ્રકરણમાં તમે નવા પ્રયોગો જોશો કે જે સદીના વળાંકે ઈ.સ. 1900ની આસપાસ નવા સિદ્ધાંતો તરફ દોરી ગયા.

સારાંશ

1. હાઈગેન્સનો સિદ્ધાંત આપણને કહે છે કે તરંગઅગ્ર પરનું દરેક બિંદુ ગૌણ તરંગોનું ઉદ્‌ગમ છે, જેઓ એકબીજામાં ઉમેરાઈને પછીના સમયે તરંગઅગ્ર આપે છે.
2. હાઈગેન્સની રચના આપણને કહે છે કે નવું તરંગઅગ્ર એ ગૌણ તરંગોના આગળની દિશામાંનું આવરણ (Envelope) છે. જ્યારે પ્રકાશની ઝડપ એ દિશાથી સ્વતંત્ર હોય ત્યારે ગૌણ તરંગો ગોળાકાર હશે. ત્યારે કિરણો બંને તરંગઅગ્રોને લંબ અને કોઈ પણ કિરણની દિશામાં માપેલો ગતિ માટેનો સમય સમાન હશે. આ સિદ્ધાંત એ બહુ જાણીતા પરાવર્તન અને વક્રીભવનના નિયમો આપે છે.

3. જ્યારે પણ બે કે તેથી વધારે પ્રકાશ ઉદ્‌ગમો એક જ બિંદુને પ્રકાશિત કરતા હોય ત્યારે તરંગોના સંપાતીકરણનો નિયમ લાગુ પાડી શકાય છે. જ્યારે આપણે આ ઉદ્‌ગમોને કારણે આપેલ બિંદુ આગળ તીવ્રતાનો વિચાર કરીએ છીએ ત્યારે બે સ્વતંત્ર તીવ્રતાઓના સરવાળા ઉપરાંત એક વધારાનું વ્યતિકરણ-પદ આવે છે, પરંતુ આ પદ ફક્ત ત્યારે જ અગત્યનું બને છે જ્યારે તેની સરેરાશ અશૂન્ય હોય છે. પણ આવું ત્યારે જ બનશે જ્યારે ઉદ્‌ગમોને સમાન આવૃત્તિ હશે અને તેઓ વચ્ચે અચળ (સ્થાયી) કળા તફાવત હશે.
4. યંગના પ્રયોગમાં, d જેટલું અંતર ધરાવતી બે સ્લિટો, સમાન અંતરે રહેલી અને λ/d જેટલું કોણીય અંતર ધરાવતી શલાકાઓ આપે છે. ઉદ્‌ગમ, સ્લિટોનું મધ્યબિંદુ અને મધ્યસ્થ પ્રકાશિત શલાકા એક જ રેખા પર આવેલા હોય છે. જો સ્લિટ આગળ આંતરેલ ખૂણાનું મૂલ્ય λ/d કરતા વધારે હોય તો વિસ્તૃત (Extended) ઉદ્‌ગમ શલાકાઓનો નાશ કરશે.
5. a પહોળાઈ ધરાવતી એક સ્લિટ મધ્યસ્થ અધિકતમ સાથેની વિવર્તન ભાત આપે છે. $\pm\lambda/a$, $\pm 2\lambda/a$ ... વગેરે ખૂણાઓ આગળ તીવ્રતા ઘટીને શૂન્ય થાય છે, જેમાં વચ્ચે ક્રમિક નબળી તીવ્રતા ધરાવતા ગૌણ અધિકતમો આવેલા હોય છે. વિવર્તન ટેલિસ્કોપના કોણીય વિભેદનને λ/D સુધી સિમિત કરે છે, જ્યાં, D એ વ્યાસ છે. આના કરતા નજીક આવેલા બે તારાઓ પ્રબળ રીતે એકબીજા પર આચ્છાદિત પ્રતિબિંબો આપે છે. તે જ રીતે, n જેટલો વક્રીભવનાંક ધરાવતા માધ્યમમાં કેન્દ્ર આગળ 2 β જેટલો કોણ બનાવતો, માઈક્રોસ્કોપનો ઓબ્જેક્ટિવ $\lambda/(2n \sin\beta)$ અંતરે છૂટી પડેલી વસ્તુઓને જ અલગ જોઈ શકે છે, કે જે માઈક્રોસ્કોપની વિભેદન મર્યાદા છે. વિવર્તન એ પ્રકાશ કિરણના ખ્યાલની મર્યાદાઓ નક્કી કરે છે. તે વિવર્તનને કારણે ફેલાવવાનું શરૂ કરે તે પહેલાં, a પહોળાઈ ધરાવતું કિરણપૂંજ a^2/λ જેટલું અંતર કાપે છે; જેને ફ્રેનલ લંબાઈ કહે છે.
6. કુદરતી પ્રકાશ, દા.ત., સૂર્યમાંથી આવતો પ્રકાશ, એ અધ્રુવીભૂત હોય છે. આનો અર્થ એ થયો કે માપન દરમિયાન વિદ્યુત સદિશો લંબ સમતલમાં શક્ય હોય તેવી બધી જ દિશાઓ ખૂબ ઝડપથી અને અસ્તવ્યસ્ત રીતે ધારણ કરે છે. પોલેરોઈડ ફક્ત એક (કે જેની વિશિષ્ટ અક્ષને સમાંતર) ઘટકનું પારગમન કરે છે. પરિણામી પ્રકાશને રેખીય ધ્રુવીભૂત અથવા તલ ધ્રુવીભૂત કહે છે. જ્યારે આવા પ્રકારના પ્રકાશને બીજા પોલેરોઈડમાંથી જોવામાં આવે છે કે જેની અક્ષને 2π કોણે પરિભ્રમણ કરાવવામાં આવે ત્યારે બે મહત્તમો અને ન્યૂનતમો જોવા મળે છે. ધ્રુવીભૂત પ્રકાશ કોઈ ચોક્કસ કોણે (જેને બ્રુસ્ટર કોણ કહે છે) પરાવર્તિત કરાવવાથી અને પૃથ્વીના વાતાવરણમાં $\pi/2$ જેટલા કોણે પ્રકીર્ણન કરાવવાથી પણ મેળવી શકાય છે.

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ

1. બિંદુવત્ ઉદ્‌ગમમાંથી નીકળતા તરંગો બધી જ દિશામાં ફેલાય છે, જ્યારે પ્રકાશ એ સાંકડા કિરણને સમાંતર ગતિ કરતો માલૂમ પડે છે. પ્રકાશની વર્તણૂંકના બધા જ પાસાઓ સમજવા માટે હાઈગેન્સ, યંગ અને ફ્રેનલના આંતરદર્શન અને પ્રયોગ અંગેની સમજણની જરૂર પડી હતી.
2. યંગના પ્રયોગમાં દર્શાવ્યા મુજબ, તરંગો અંગેનું એક અગત્યનું નવું પાસું એ જુદા જુદા ઉદ્‌ગમોમાંથી નીકળતા કંપવિસ્તારોનું વ્યતિકરણ છે, જે સહાયક અને વિનાશક એમ બંને હોય છે.
3. વિવર્તનની ઘટના એ કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્રની મર્યાદાઓ વ્યાખ્યાયિત કરે છે. માઈક્રોસ્કોપ અને ટેલિસ્કોપ માટે એકબીજાની ઘણી નજીક રહેલી વસ્તુઓને અલગ દર્શાવવાની ક્ષમતા એ પ્રકાશની તરંગલંબાઈ દ્વારા નક્કી થાય છે.
4. મોટા ભાગની વ્યતિકરણ અને વિવર્તન અસરો સંગત તરંગો, જેવાકે હવામાં ધ્વનિતરંગો, માટે પણ જોવા મળે છે, પરંતુ ધ્રુવીભવન ઘટના એ લંબગત તરંગો જેવાકે પ્રકાશ તરંગોના ખાસ કિસ્સામાં જ જોવા મળે છે.

સ્વાધ્યાય

10.1 589 nm તરંગલંબાઈ ધરાવતો એકરંગી પ્રકાશ હવામાંથી પાણીની સપાટી ઉપર આપાત થાય છે. તો (a) પરાવર્તિત અને (b) વક્રીભૂત પ્રકાશની તરંગલંબાઈ, આવૃત્તિ અને ઝડપ કેટલી હશે ? પાણીનો વક્રીભવનાંક 1.33 છે.

10.2 નીચેના આપેલા દરેક કિસ્સા માટે તરંગઅગ્રનો આકાર શું હશે ?

(a) બિંદુવત્ત ઉદ્‌ગમમાંથી ફેલાતો પ્રકાશ.

(b) બહિર્ગોળ લેન્સમાંથી નિર્ગમન પામતો પ્રકાશ કે જ્યારે બિંદુવત્ત ઉદ્‌ગમ તેના કેન્દ્ર ઉપર મૂકેલ હોય.

(c) દૂર રહેલા તારાના પ્રકાશના તરંગઅગ્રનો પૃથ્વી દ્વારા આંતરાતો ભાગ.

10.3 (a) કાચનો વક્રીભવનાંક 1.5 છે. પ્રકાશની કાચમાં ઝડપ કેટલી હશે ?

(શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ $3.0 \times 10^8 \, m\, s^{-1}$ છે.)

(b) શું પ્રકાશની કાચમાં ઝડપ પ્રકાશના રંગથી સ્વતંત્ર છે ? જો ના તો બે રાતા અને જાંબલી એ બે રંગોમાંથી કયો રંગ કાચના પ્રિઝમમાંથી ધીમે ગતિ કરશે ?

10.4 યંગના બે-સ્લિટના પ્રયોગમાં, બે સ્લિટો વચ્ચેનું અંતર 0.28 mm અને પડદો 1.4 m દૂર મૂકેલો છે. મધ્યસ્થ પ્રકાશિત શલાકા અને ચોથી પ્રકાશિત શલાકા વચ્ચેનું અંતર 1.2 cm જેટલું માપવામાં આવે છે. પ્રયોગમાં વપરાયેલ પ્રકાશની તરંગલંબાઈ શોધો.

10.5 λ જેટલી એકરંગી તરંગલંબાઈ ધરાવતા પ્રકાશ સાથે કરેલા યંગના બે-સ્લિટના પ્રયોગમાં, પડદા પરના જે બિંદુએ પથતફાવત λ જેટલો થાય ત્યાં તીવ્રતા K એકમ છે. જ્યાં પથ તફાવત $\lambda/3$ થાય તે બિંદુ આગળ પ્રકાશની તીવ્રતા કેટલી હશે ?

10.6 યંગના બે-સ્લિટ પ્રયોગમાં વ્યતિકરણ શલાકાઓ મેળવા માટે 650 nm અને 520 nm બે તરંગલંબાઈઓ ધરાવતા પ્રકાશ કિરણપૂંજનો ઉપયોગ કરવામાં આવે છે.

(a) 650 nm તરંગલંબાઈ માટે પડદા પરની ત્રીજી પ્રકાશિત શલાકાનું મધ્યસ્થ અધિક્તમથી અંતર શોધો.

(b) બંને તરંગલંબાઈઓને કારણે મળતી પ્રકાશિત શલાકાઓ એકબીજા પર સંપાત થાય તે માટેનું મધ્યસ્થ અધિક્તમથી ઓછામાં ઓછું અંતર શોધો.

10.7 બે-સ્લિટના પ્રયોગમાં 1 મી દૂર મૂકેલા પડદા પર એક શલાકાની કોણીય પહોળાઈ 0.2° મળે છે. વપરાયેલ પ્રકાશની તરંગલંબાઈ 600 nm છે. જો આખાય પ્રાયોગિક સાધનને પાણીમાં ડૂબાડવામાં આવે તો તે શલાકાની કોણીય પહોળાઈ કેટલી થશે ? પાણીનો વક્રીભવનાંક 4/3 લો.

10.8 હવામાંથી કાચમાં જતા પ્રકાશ માટે બ્રુસ્ટર કોણ કેટલો હશે ? (કાચનો વક્રીભવનાંક = 1.5).

10.9 એક સમતલ પરાવર્તક સપાટી ઉપર 5000 Å તરંગલંબાઈનો પ્રકાશ આપાત થાય છે. પરાવર્તિત પ્રકાશની તરંગલંબાઈ અને આવૃત્તિ કેટલી હશે ? કયા આપાતકોણે, પરાવર્તિત કિરણ એ આપાતકિરણને લંબ હશે ?

10.10 4 mm જેટલું અડચણ અને 400 nm તરંગલંબાઈ માટે અંતરનો અંદાજ માંડો કે જેના માટે કિરણ પ્રકાશવિજ્ઞાન એ સારી સંનિકટતા હોય.

વધારાના સ્વાધ્યાય

10.11 એક તારામાં હાઈડ્રોજન દ્વારા ઉત્સર્જિત 6563ની H_α રેખા 15 $\mathring{A}$ જેટલી Red-Shift થયેલી જણાય છે. તારાની પૃથ્વીથી દૂર જવાની ઝડપનો અંદાજ શોધો.

10.12 કણવાદ એ પ્રકાશની માધ્યમ, ધારોકે પાણીમાં ઝડપ, શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ કરતા વધારે હોવાનું અનુમાન કેવી રીતે કરે છે ? તે સમજાવો. શું પ્રાયોગિક રીતે પાણીમાં મપાયેલ પ્રકાશની ઝડપ આ અનુમાનની પુષ્ટિ કરે છે ? જો ના, તો પ્રકાશ માટે બીજું કયું માનસચિત્ર એ પ્રયોગ સાથે સુસંગતતા ધરાવે છે ?

10.13 તમે પુસ્તકમાં ભણી ગયા કે કેવી રીતે હાઈગેન્સનો સિદ્ધાંત પરાવર્તન અને વક્રીભવનના નિયમો તરફ દોરી જાય છે. આ જ સિદ્ધાંતનો ઉપયોગ કરી એક સમતલ અરીસાની સામે રાખેલ બિંદુવત્ત પદાર્થના આભાસી પ્રતિબિંબનું અરીસાથી અંતર, અરીસાથી વસ્તુ અંતર જેટલું હોય છે તેમ સાબિત કરો.

10.14 આપણે પ્રકાશ તરંગના પ્રસરણની ઝડપને શક્યતઃ અસર કરતા હોય તેવા કેટલાક મુદ્દાઓની સૂચિ બનાવીએ.

(i) ઉદ્‌ગમનો પ્રકાર

(ii) પ્રસરણ દિશા

(iii) ઉદ્‌ગમની અને /અથવા અવલોકનકારની ગતિ

(iv) તરંગલંબાઈ

(v) તરંગની તીવ્રતા

ઉપરના કયા મુદ્દાઓ પર

(a) શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ;

(b) માધ્યમ (ધારો કે કાચ અથવા પાણી)માં પ્રકાશની ઝડપ;

આધાર (જો રાખતા હોય તો) રાખે છે ?

10.15 ધ્વનિ તરંગો માટે, બે પરિસ્થિતિઓ : (i) સ્થિર ઉદ્‌ગમ; અવલોકનકાર ગતિમાં અને (ii) ઉદ્‌ગમ ગતિમાં, અવલોકનકાર સ્થિર, માટે આવૃત્તિના ફેરફાર (Shift)નું સૂત્ર થોડુંક જુદું પડે છે. પરંતુ શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશ તરંગો માટે આ બંને પરિસ્થિતિઓમાં ડૉપ્લર અસર માટેનાં સૂત્રો એક સમાન જ માલૂમ પડે છે. આવું શા માટે છે તે સમજાવો. પ્રકાશ જ્યારે માધ્યમમાં ગતિ કરતો હોય ત્યારે પણ તમે શું આ સૂત્રો સમાન હશે તેમ અપેક્ષા રાખો છો ?

10.16 600 nm તરંગલંબાઈ ધરાવતા પ્રકાશની મદદથી કરેલ બે-સ્લિટ પ્રયોગમાં, દૂર રાખેલા પડદા પર મળેલ શલાકાની કોણીય પહોળાઈ 0.1° મળે છે. બે સ્લિટો વચ્ચેનું અંતર કેટલું હશે ?

10.17 નીચેના પ્રશ્નોના ઉત્તર આપો.

(a) એક સ્લિટથી થતા વિવર્તન પ્રયોગમાં, સ્લિટની પહોળાઈ મૂળ પહોળાઈ કરતા બમણી કરવામાં આવે છે. આ કેવી રીતે મધ્યસ્થ વિવર્તન પટ્ટાની જાડાઈ અને તીવ્રતાને અસર કરશે ?

(b) બે-સ્લિટથી કરાતા પ્રયોગમાં કેવી રીતે દરેક સ્લિટથી મળતું વિવર્તન એ વ્યતિકરણ ભાત સાથે સંબંધ ધરાવે છે ?

(c) દૂરના ઉદ્‌ગમમાંથી આવતા પ્રકાશના પથમાં જ્યારે નાનું વર્તુળાકાર અડચણ મૂકવામાં આવે ત્યારે અડચણના પડછાયાના કેન્દ્ર ભાગ આગળ એક તેજસ્વી ટપકું જોવા મળે છે. સમજાવો શા માટે ?

(d) 10 m લાંબા રૂમમાં બે વિદ્યાર્થીઓ 7 mના વિભાગ પાડતી (Partition) દિવાલથી અલગ કરેલા છે. જો પ્રકાશ અને ધ્વનિ એ બન્ને તરંગો અડચણની ધારથી વાંકા વળી શકતા હોય તો શા માટે વિદ્યાર્થીઓ એક બીજા સાથે વાતચીત કરી શકે છે પરંતુ એકબીજાને જોઈ શકતા નથી ?

(e) કિરણ પ્રકાશવિજ્ઞાન એ પૂર્વધારણા પર આધારિત છે કે પ્રકાશ સુરેખામાં ગતિ કરે છે. વિવર્તન અસરો (જ્યારે પ્રકાશ નાના અડચણ / સ્લિટમાંથી પસાર થાય છે અથવા નાના અડચણથી વાંકુ વળે છે ત્યારે જોવા મળે છે) આ પૂર્વધારણાનું ખંડન કરે છે. તેમ છતાં કિરણ પ્રકાશશાસ્ત્ર પૂર્વધારણા સામાન્ય વપરાશના પ્રકાશીય ઉપકરણોમાં પ્રતિબિંબનું સ્થાન અને બીજા ગુણધર્મો સમજાવવા માટે વપરાય છે. આની પૃષ્ઠિ કેવી રીતે કરશો ?

10.18 બે ટેકરીઓ પર રહેલા બે ટાવરો એકબીજાથી 40 km દૂર છે. તેમને જોડતી રેખા બરાબર વચ્ચે આવેલી ટેકરીની 50 m ઉપરથી પસાર થાય છે. નોંધપાત્ર વિવર્તન અસરો સિવાય બે ટાવરો વચ્ચે મોકલી શકાય તેવા રેડિયો તરંગોની સૌથી વધુ તરંગલંબાઈ કેટલી હશે ?

10.19 500 nm તરંગલંબાઈ ધરાવતું સમાંતર પ્રકાશ કિરણપૂંજ એક સાંકડી સ્લિટ પર પડે છે અને પરિણામી વિવર્તનભાત 1 m દૂર રાખેલા પડદા ઉપર જોવામાં આવે છે. એવું જોવા મળે છે કે, પ્રથમ ન્યૂનત્તમ પડદાના કેન્દ્રથી 2.5 mm અંતરે આવેલ છે. સ્લિટની પહોળાઈ શોધો.

10.20 નીચેના પ્રશ્નોના જવાબ આપો.

(a) જ્યારે પ્રમાણમાં નીચી ઊંચાઈએ ઉડતું હવાઈ જહાજ માથા પરથી પસાર થાય છે ત્યારે આપણે ઘણી વખત ટીવી પડદા પરના ચિત્રમાં ધ્રુજારી થતી નોંધીએ છીએ. આની શક્ય સમજૂતી જણાવો.

(b) તમે પુસ્તકમાં શીખી ગયાં છો તેમ તરંગના સ્થાનાંતર માટેના રેખીય સંપાતપણાનો સિધ્ધાંત એ વિવર્તન અને વ્યતિકરણ ભાતોના તીવ્રતા વિતરણ માટેનો આધાર છે. આ સિધ્ધાંતનું વ્યાજબીપણું શું છે ?

10.21 એક સ્લિટ વિવર્તન ભાત મેળવતી વખતે આપણે નોંધ્યું કે $n\lambda/a$ ખૂણાઓ આગળ તીવ્રતા શૂન્ય થાય છે. સ્લિટને યોગ્ય ભાગમાં વહેંચીને તીવ્રતાની થતી નાબૂદી દ્વારા આનું વ્યાજબીપણું દર્શાવો.

પ્રકરણ અગિયાર

વિકિરણ અને દ્રવ્યની દ્વૈત પ્રકૃતિ (DUAL NATURE OF RADIATION AND MATTER)

11.1 પ્રસ્તાવના (INTRODUCTION)

વિદ્યુતચુંબકત્વ માટેના મેક્સવેલનાં સમીકરણો અને 1887માં વિદ્યુતચુંબકીય તરંગો ઉત્પન્ન કરવા અને તેમને પરખવા (Detection) માટેના હર્ટ્ઝના પ્રયોગોએ પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપને દૃઢપણે સ્થાપિત કર્યું હતું. તે જ સમયગાળા દરમિયાન 19મી સદીના અંત વખતે, ડિસ્ચાર્જ ટ્યૂબમાં નીચા દબાણે રહેલા વાયુઓમાંથી વિદ્યુત વિભાર (ઈલેક્ટ્રીક ડિસ્ચાર્જ)ના પ્રાયોગિક અવલોકનો ઘણી બધી ઐતિહાસિક શોધોખોળો તરફ દોરી ગયા. 1895માં રૉન્જન (Roentgen) દ્વારા X-Ray (ક્ષ-કિરણો), તથા 1897માં જે. જે. થોમસન દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉનની શોધ, એ પરમાણુની રચના સમજવા માટેનાં અગત્યના માર્ગસ્તંભ હતા. એમ જાણવા મળ્યું હતું કે પારાના લગભગ 0.001 mm સ્તંભ જેટલા પુરતા ઓછા દબાણે, ડિસ્ચાર્જ ટ્યુબમાં રહેલા વાયુ પર બે ઈલેક્ટ્રૉડ્સ (વિદ્યુત અગ્રો) વચ્ચે વિદ્યુતક્ષેત્ર લાગુ પાડતાં ડિસ્ચાર્જ (વિદ્યુત વિભાર) ઉત્પન્ન થાય છે. કૅથોડની સામેની બાજુના કાચ પર પ્રસ્ફુરક (ફ્લોરેસન્ટ) ઝગારો (Glow) દેખાય છે. કાચ પરના પ્રસ્ફુરક (ફ્લોરેસન્ટ) પ્રકાશનો રંગ, કાચના પ્રકાર પર આધાર રાખતો હતો, જેમકે સોડા-કાચ પર પીળાશ પડતો લીલો રંગ હતો. આ પ્રસ્ફુરણ (ફ્લોરેસન્સ) માટે કૅથોડ પરથી આવતા વિકિરણને કારણભૂત માનવામાં આવ્યું હતું. કૅથોડ કિરણોની શોધ 1870માં વિલિયમ ક્રુક્સે (William Crookes) કરી હતી, જેમણે પછીથી 1879માં સૂચવ્યું હતું કે આ કિરણો ખૂબ ઝડપથી ગતિ કરતા ઋણ વિદ્યુતભારિત કણોના પ્રવાહના બનેલા છે. બ્રિટીશ ભૌતિકશાસ્ત્રી જે. જે. થોમસને (J. J. Thomson, 1856-1940) આ અધિતર્કની પુષ્ટિ આપી. ડિસ્ચાર્જ ટ્યૂબ પર પરસ્પર લંબ રૂપે વિદ્યુત અને ચુંબકીયક્ષેત્રો લગાડીને જે. જે. થોમસને સૌ પ્રથમ આ કૅથોડ કિરણોના કણોની ઝડપ અને વિશિષ્ટ વિદ્યુતભાર [વિદ્યુતભાર અને દ્રવ્યમાનનો ગુણોત્તર (e/m)]ના પ્રાયોગિક મૂલ્યો મેળવ્યા. તેઓ

(કૅથોડ કિરણોના કણો) પ્રકાશની ઝડપ (3×10^8 m/s)ના લગભગ 0.1 થી 0.2 ગણી ઝડપથી ગતિ કરતા માલુમ પડ્યા હતા. હાલમાં e/mનું સ્વીકારેલ મૂલ્ય 1.76×10^{11} C/kg છે. આ ઉપરાંત, e/mનું મૂલ્ય કૅથોડ (ઉત્સર્જક) માટે ઉપયોગમાં લેવાયેલા દ્રવ્ય/ધાતુના પ્રકાર પર, કે ડિસ્ચાર્જ ટ્યૂબમાં રાખેલા વાયુ પર, આધાર રાખતું ન હોવાનું માલુમ પડ્યું હતું. આ અવલોકન કૅથોડ રે કણોનું સાર્વત્રિકપણું (Universality) સૂચવે છે.

આ જ સમયગાળા દરમિયાન, 1887માં એવું જાણવામાં આવ્યું કે કેટલીક ધાતુઓ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરતાં, ઓછી ઝડપ ધરાવતા ઋણ વિદ્યુતભારિત કણો ઉત્સર્જિત થાય છે. આ ઉપરાંત, કેટલીક ધાતુઓને ઊંચા તાપમાને ગરમ કરતાં તે ઋણ વિદ્યુતભારિત કણો ઉત્સર્જિત કરતી હોવાનું માલુમ પડ્યું હતું. આ કણો માટે પણ e/mનું મૂલ્ય કૅથોડ રે કણો જેટલું જ જાણવા મળ્યું હતું. આ બધા અવલોકનોએ પ્રસ્થાપિત કર્યું કે આ બધા જ કણો, ભલે તે જુદી જુદી રીતે ઉત્પન્ન થયા હોય, એક સમાન પ્રકૃતિ ધરાવે છે, જેમને 1897માં જે. જે. થોમસને *ઈલેક્ટ્રૉન* (*Electrons*) એવું નામ આપ્યું, અને દર્શાવ્યું કે તેઓ દ્રવ્યનો મૂળભૂત, સાર્વત્રિક ઘટક છે. વાયુઓ વડે વિદ્યુત વહનના સૈદ્ધાંતિક અને પ્રાયોગિક નિરીક્ષણો દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉનની યુગ પ્રવર્તક શોધ કરવા બદલ તેમને 1906માં ભૌતિકવિજ્ઞાન માટેનું નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત થયું હતું. 1913માં, અમેરીકન ભૌતિકશાસ્ત્રી આર. એ. મિલિકને (R. A. Millikan, 1868-1953) ઈલેક્ટ્રૉનનો વિદ્યુતભાર ચોક્કસ રીતે માપવા માટે નવો જ, તેલના બુંદ (Oil-Drop)નો પ્રયોગ કર્યો. તેમને જાણવા મળ્યું કે તેલના ટીપા પરનો વિદ્યુતભાર હંમેશા પ્રાથમિક વિદ્યુતભાર, 1.602×10^{-19} Cના પૂર્ણાંક ગુણકમાં જ મળે છે. આમ, મિલિકનના પ્રયોગે સ્થાપિત કર્યું કે *વિદ્યુતભાર ક્વૉન્ટાઈઝ્ડ* (*ક્વૉન્ટમીકૃત*) હોય છે. વિદ્યુતભાર (e) અને વિશિષ્ટ વિદ્યુતભાર (e/m)ના મૂલ્ય પરથી, ઈલેક્ટ્રૉનનું દ્રવ્યમાન (m) શોધી શકાય.

11.2 ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન (Electron Emission)

આપણે જાણીએ છીએ કે ધાતુઓ મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉન (ઋણ વિદ્યુતભારિત કણો) ધરાવે છે જે તેમની વાહકતા માટે જવાબદાર છે. આમ છતાં, મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉન સામાન્ય રીતે ધાતુની સપાટી પરથી છટકી શકતા નથી. જો કોઈ ઈલેક્ટ્રૉન ધાતુમાંથી બહાર નીકળવા પ્રયત્ન કરે, તો ધાતુની સપાટી ધન વિદ્યુતભાર પ્રાપ્ત કરે છે અને ઈલેક્ટ્રૉનને પાછો ધાતુમાં ખેંચી લે છે. આમ, આયનોના આકર્ષીબળોના કારણે મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉન ધાતુની સપાટીમાં પકડાઈ રહે છે. પરિણામ સ્વરૂપે, જો ઈલેક્ટ્રૉન આ આકર્ષી બળને ઓળંગી શકે (પહોંચી વળે) તેટલી પુરતી ઊર્જા ધરાવતો હોય તો જ તે ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર નીકળી શકે. ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનને બહાર કાઢવા માટે અમુક ચોક્કસ લઘુત્તમ ઊર્જા આપવી પડે છે. ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનને છટકી જવા માટે જરૂરી એવી આ લઘુત્તમ ઊર્જાને તે ધાતુનું *કાર્ય વિધેય* (*Work Function*) કહે છે. તેને સામાન્ય રીતે ϕ_0 વડે દર્શાવાય છે અને તેને eV (electron Volt)માં માપવામાં આવે છે. ઈલેક્ટ્રૉનને 1 વોલ્ટના વિદ્યુત સ્થિતિમાન તફાવત વડે પ્રવેગિત કરતાં તેણે મેળવેલી ઊર્જાને એક ઈલેક્ટ્રૉન વોલ્ટ કહે છે, એટલે કે 1 eV $= 1.602 \times 10^{-19}$ J.

ઊર્જાના આ એકમનો ઉપયોગ સામાન્ય રીતે પરમાણ્વિક અને ન્યુક્લિયર ભૌતિકવિજ્ઞાનમાં થાય છે. કાર્ય વિધેય (ϕ_0), ધાતુના ગુણધર્મો અને તેની સપાટીના પ્રકાર પર આધાર રાખે છે. કેટલીક ધાતુઓના કાર્ય વિધેયના મૂલ્યો કોષ્ટક 11.1માં આપેલા છે. આ મૂલ્યો લગભગ છે કારણકે તે ધાતુની સપાટી પરની અશુધ્ધિ પ્રત્યે ખૂબ સંવેદી છે.

કોષ્ટક 11.1 પરથી નોંધો કે કાર્ય વિધેયનું મૂલ્ય પ્લેટિનમ માટે મહત્તમ ($\phi_0 = 5.65$ eV) છે, જ્યારે સિઝિયમ માટે તે લઘુત્તમ ($\phi_0 = 2.14$ eV) છે.

ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનના ઉત્સર્જન માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જા, મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉનને નીચે આપેલી ભૌતિક પ્રક્રિયાઓમાંથી કોઈ પણ એક રીતે આપી શકાય :

(i) *તાપીય (થર્મીઓનિક) ઉત્સર્જન* : યોગ્ય રીતે ગરમ કરીને મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉનને પુરતી તાપીય (થર્મલ) ઊર્જા આપી શકાય કે જેથી તેઓ ધાતુ (ની સપાટી)માંથી બહાર નીકળી શકે.

કોષ્ટક 11.1 કેટલીક ધાતુઓનાં કાર્ય વિધેય

ધાતુ	કાર્ય વિધેય ϕ_0 (*e*V)	ધાતુ	કાર્ય વિધેય ϕ_0 (*e*V)
C*s*	2.14	A*l*	4.28
K	2.30	H*g*	4.49
N*a*	2.75	C*u*	4.65
C*a*	3.20	A*g*	4.70
M*o*	4.17	N*i*	5.15
P*b*	4.25	P*t*	5.65

(ii) *ક્ષેત્રીય ઉત્સર્જન* : સ્પાર્ક પ્લગની જેમ, ધાતુ પર ખૂબ પ્રબળ વિદ્યુતક્ષેત્ર (10^8 Vm^{-1}ના ક્રમનું) લગાડીને, ઈલેક્ટ્રૉનને ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર (ખેંચી) કાઢી શકાય.

(iii) *ફોટો-ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન* : જ્યારે યોગ્ય આવૃત્તિનો પ્રકાશ ધાતુ પર આપાત કરવામાં આવે ત્યારે ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન થાય છે. આ ફોટો (પ્રકાશ)-ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રૉનને *ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન* કહે છે.

11.3 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર (Photo Electric Effect)

11.3.1 હર્ટ્ઝના અવલોકનો (Hertz's Observations)

વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોના પ્રયોગો દરમ્યાન, 1887માં હેન્રી હર્ટ્ઝે (Heinrich Hertz, 1857-1894) ફોટો-ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનની ઘટના શોધી હતી. સ્પાર્કના ડીસ્ચાર્જ દ્વારા વિદ્યુતચુંબકીય તરંગોના ઉત્સર્જનના પ્રાયોગિક અવલોકન દરમિયાન હર્ટ્ઝે અવલોકન કર્યું કે જ્યારે ઉત્સર્જક પ્લેટને આર્ક લૅમ્પના અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ વડે પ્રકાશિત કરવામાં આવે ત્યારે) ડીટેક્ટર લૂપની આસપાસ ઊંચા વોલ્ટેજના સ્પાર્ક વધુ તીવ્ર હતા.

ધાતુની સપાટી પર પ્રકાશ આપાત કરતાં મુક્ત, વિદ્યુતભારિત કણો તેમાંથી બહાર ભાગી છૂટતા હતા જેમને હવે આપણે ઈલેક્ટ્રૉન તરીકે ઓળખીએ છીએ. જ્યારે ધાતુની સપાટી પર પ્રકાશ આપાત થાય, ત્યારે (ધાતુની) સપાટી પાસેના કેટલાક ઈલેક્ટ્રૉન આપાત વિકિરણોમાંથી, પદાર્થની સપાટીમાં રહેલા ધન આયનોના આકર્ષણ બળને ઓળંગી શકાય એટલી, પુરતી ઊર્જા મેળવે છે. આપાત પ્રકાશમાંથી પુરતી ઊર્જા મેળવ્યા પછી ઈલેક્ટ્રૉન ધાતુની સપાટીમાંથી આસપાસના અવકાશમાં મુક્ત થાય છે.

11.3.2 હોલવાશ અને લેનાર્ડના અવલોકનો (Hallwachs' and Lenard's Observations)

વિલ્હેમ હોલવાશ અને ફીલીપ લેનાર્ડે 1886-1902ના ગાળામાં ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનની ઘટનાનો અભ્યાસ કર્યો હતો.

લેનાર્ડે (1862-1947) અવલોકન કર્યું કે, જ્યારે બે ઈલેક્ટ્રૉડ (ધાતુની પટ્ટીઓ)ને સમાવતી શૂન્યાવકાશિત કાચની નળીમાં રહેલી ઉત્સર્જક પ્લેટ (પટ્ટી) પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ વિકિરણ આપાત કરવામાં આવે ત્યારે પરિપથમાં વિદ્યુતપ્રવાહ વહે છે (આકૃતિ 11.1). જ્યારે અલ્ટ્રાવાયોલેટ વિકિરણ આપાત કરવાનું બંધ કરવામાં આવે ત્યારે તરત જ વિદ્યુતપ્રવાહ પણ અટકી જાય છે. આ અવલોકનો દર્શાવે છે કે, જ્યારે ઉત્સર્જક પ્લેટ C પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ વિકિરણ પડે છે ત્યારે તેમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન

થાય છે, જે વિદ્યુતક્ષેત્ર દ્વારા ધન કલેક્ટર પ્લેટ A તરફ આકર્ષાય છે. ઈલેક્ટ્રૉન્સ શૂન્યાવકાશિત નળીમાંથી પસાર થાય છે અને પરિણામે વિદ્યુતપ્રવાહનું વહન થાય છે. આમ, ઉત્સર્જકની સપાટી પર આપાત થતા પ્રકાશના કારણે બાહ્ય પરિપથમાં વિદ્યુતપ્રવાહનું વહન થાય છે. હોલવાશ અને લેનાર્ડ કલેક્ટર પ્લેટના સ્થિતિમાન તથા આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ અને તીવ્રતા સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ કેવી રીતે બદલાય છે તેનો અભ્યાસ કર્યો હતો.

1888માં હોલવાશે વધુ અભ્યાસ કર્યો અને ઈલેક્ટ્રૉસ્કોપ સાથે ઋણ વિદ્યુતભારિત ઝિંક પ્લેટ જોડી. તેમને એવું જોવા મળ્યું કે જ્યારે ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરવામાં આવ્યો, ત્યારે પ્લેટે તેનો વિદ્યુતભાર ગુમાવ્યો. ઉપરાંત વિદ્યુતભાર રહિત ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરતાં, તે ધન વિદ્યુતભારિત બની. ધન વિદ્યુતભારિત ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરતા તેના પરનો ધનવિદ્યુતભાર વધ્યો આ અવલોકનો પરથી તેમણે તારવ્યું કે ઝિંક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરતાં તેમાંથી ઋણ વિદ્યુતભારિત કણો ઉત્સર્જિત થાય છે.

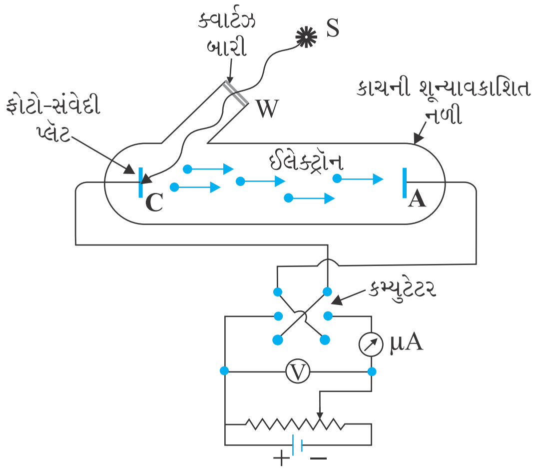
1897માં ઈલેક્ટ્રૉનની શોધ બાદ એ સ્પષ્ટ થયું કે, ઉત્સર્જક પ્લેટ પર પ્રકાશ આપાત કરતાં તેમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન્સ ઉત્સર્જિત થાય છે. ઋણ વિદ્યુતભારના કારણે ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રૉન વિદ્યુતક્ષેત્ર દ્વારા કલેક્ટર પ્લેટ તરફ ધકેલાય છે. હોલવાશ અને લેનાર્ડે એ પણ અવલોકન કર્યું કે જ્યારે ઉત્સર્જક પ્લેટ પર અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ આપાત કરીએ ત્યારે, આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ, અમુક લઘુત્તમ મૂલ્ય - જેને *થ્રેશોલ્ડ (સીમાંત) આવૃત્તિ* કહે છે તે - કરતાં ઓછી હોય તો એક પણ ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થતો નથી. આ લઘુત્તમ આવૃત્તિ ઉત્સર્જક પ્લેટના દ્રવ્યના પ્રકાર (પ્રકૃતિ) પર આધાર રાખે છે.

એવું જાણવા મળ્યું હતું કે ઝિંક, કેડમિયમ, મૅગ્નેશિયમ વગેરે જેવી કેટલીક ધાતુઓ સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન કરવા માટે ટૂંકી આવૃત્તિવાળા અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશને જ પ્રતિભાવ આપે છે. જો કે કેટલીક આલ્કલી ધાતુઓ જેમકે લિથિયમ, સોડિયમ, પોટેશિયમ, સિઝિયમ અને રૂબિડિયમ જેવી આલ્કલી ધાતુઓ દૃશ્ય પ્રકાશ માટે પણ સંવેદનશીલ છે. આ બધા જ *પ્રકાશ સંવેદી (ફોટો સેન્સિટીવ) દ્રવ્યો* પર પ્રકાશ આપાત કરતાં તે ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન કરે છે. ઈલેક્ટ્રૉનની શોધ થયા બાદ આ ઈલેક્ટ્રૉનને ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન કહેવામાં આવ્યા. આ ઘટનાને *ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર* કહે છે.

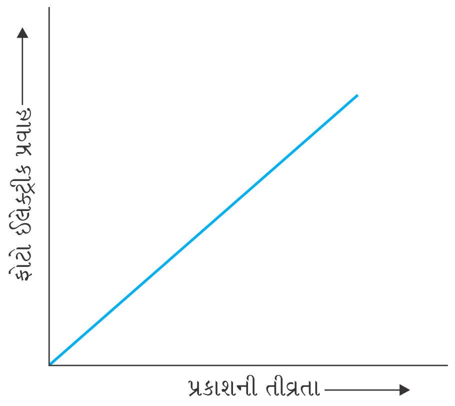
Simulate experiments on photoelectric effect
http://www.eo.ucar.edu/rainbows
http://www.atoptics.co.uk/bows.htm

11.4 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરનો પ્રાયોગિક અભ્યાસ (Exprimental Study of Photoelectric Efect)

આકૃતિ 11.1માં ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરનો અભ્યાસ કરવા માટેની પ્રાયોગિક ગોઠવણીની રૂપરેખા દર્શાવી છે. તેમાં શૂન્યાવકાશિત કાચ/ક્વાર્ટ્ઝની નળી (ટ્યૂબ)ની અંદર પ્રકાશ સંવેદી પ્લેટ C અને બીજી ધાતુની પ્લેટ A દર્શાવેલ છે. પ્રકાશ ઉદ્‌ગમ Sમાંથી પુરતી ઓછી તરંગલંબાઈવાળો એકવર્ણી (Monochromatic - એક રંગી) પ્રકાશ બારી Wમાં થઈને પ્રકાશ સંવેદી પ્લેટ (ઉત્સર્જક) C પર આપાત થાય છે. પારદર્શક ક્વાર્ટ્ઝની બારીને કાચની ટ્યૂબ પર લગાડવામાં આવી હોય છે, જે તેમાંથી અલ્ટ્રાવાયોલેટ કિરણને પસાર થવા દે છે, જે ફોટો સેન્સિટીવ પ્લેટ C પર આપાત થાય છે. પ્લેટ Cમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થાય છે અને બૅટરી વડે ઉત્પન્ન થયેલા વિદ્યુતક્ષેત્રના કારણે (કલેક્ટર) પ્લેટ A દ્વારા એકત્રિત થાય છે. બૅટરી, C અને A વચ્ચે વિદ્યુત સ્થિતિમાનનો તફાવત જાળવી રાખે છે, જે બદલી પણ શકાય છે. પ્લેટ C અને પ્લેટ Aની ધ્રુવત્વ (Polarity - ધન કે ઋણ) ને કમ્યુટેટર દ્વારા ઊલટાવી શકાય છે. આમ, ઉત્સર્જક C ની સાપેક્ષે પ્લેટ A ને ઈચ્છિત ધન કે ઋણ સ્થિતિમાને રાખી શકાય છે. જ્યારે ઉત્સર્જક પ્લેટ Cની સાપેક્ષે કલેક્ટર પ્લેટ A ધન હોય, ત્યારે ઈલેક્ટ્રૉન તેના તરફ આકર્ષાય છે. ઈલેક્ટ્રૉનના ઉત્સર્જનના કારણે પરિપથમાં વિદ્યુતપ્રવાહનું વહન થાય છે. ઉત્સર્જક અને કલેક્ટર પ્લેટ વચ્ચે વિદ્યુત સ્થિતિમાનનો તફાવત વૉલ્ટમીટર (V) વડે માપી શકાય છે. જ્યારે પરિપથમાં મળતો ફોટો



આકૃતિ 11.1 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર સમજવા માટે પ્રાયોગિક ગોઠવણી



આકૃતિ 11.2 પ્રકાશની તીવ્રતા સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહનો ફેરફાર

વિદ્યુતપ્રવાહ માઈક્રોએમીટર (μA) વડે માપી શકાય છે. ઉત્સર્જક પ્લેટ Cની સાપેક્ષે કલેક્ટર પ્લેટ A પરનું સ્થિતિમાન બદલીને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ વધારી કે ઘટાડી શકાય છે. ઉત્સર્જક C અને કલેક્ટર A વચ્ચેના વિદ્યુત સ્થિતિમાનના તફાવત Vની જેમ આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા અને આવૃત્તિ પણ બદલી શકાય છે.

આપણે આકૃતિ 11.1માં દર્શાવેલ પ્રાયોગિક ગોઠવણીનો ઉપયોગ કરીને (a) વિકિરણની તીવ્રતા, (b) આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ, (c) પ્લેટ A અને C વચ્ચે વિદ્યુત સ્થિતિમાનનો તફાવત, અને (d) પ્લેટ C માટે વપરાયેલ દ્રવ્યના પ્રકારની સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહના ફેરફારનો અભ્યાસ કરી શકીએ. ઉત્સર્જક C પર આપાત થતા પ્રકાશના માર્ગમાં યોગ્ય રંગના ફિલ્ટર કે રંગીન કાચ મૂકીને જુદી જુદી આવૃત્તિના પ્રકાશનો ઉપયોગ કરી શકીએ. પ્રકાશની તીવ્રતાને બદલવા માટે આપણે ઉત્સર્જક અને પ્રકાશ ઉદ્‌ગમ વચ્ચેનું અંતર બદલી શકીએ.

11.4.1 પ્રકાશની તીવ્રતાની ફોટો પ્રવાહ પર અસર (Effect of Intensity of Light on Photocurrent)

ઉત્સર્જક Cની સાપેક્ષે કલેક્ટર Aને ધન સ્થિતિમાને રાખવામાં આવે છે કે જેથી C પરથી ઉત્સર્જાયેલા ઈલેક્ટ્રૉન કલેક્ટર A તરફ આકર્ષાય. આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ અને સ્થિતિમાન અચળ રાખીને, વિકિરણની તીવ્રતા બદલવામાં આવે છે અને દરેક વખતે પરિણામી ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ માપવામાં આવે છે. આકૃતિ 11.2માં દર્શાવેલ આલેખ મુજબ પ્રકાશની તીવ્રતામાં થતા વધારા સાથે ફોટો પ્રવાહ રેખીય રીતે વધતો હોવાનું જણાય છે. ફોટો પ્રવાહ એક સેકન્ડમાં ઉત્સર્જાતા ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યાના સમપ્રમાણમાં હોય છે. આ દર્શાવે છે કે *એક સેકન્ડમાં ઉત્સર્જાયેલા ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા આપાત પ્રકાશની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે.*

11.4.2 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ પર વિદ્યુતદબાણની અસર (Effect of Potential on Photoelectric Current)

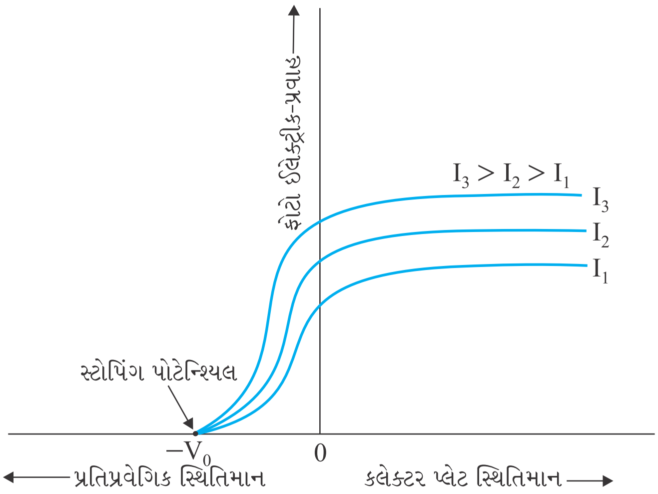
પ્રારંભમાં આપણે પ્લેટ Cની સાપેક્ષે પ્લેટ Aને કોઈ ધન સ્થિતિમાને રાખીએ તથા પ્લેટ C પર અચળ (ચોક્કસ) આવૃત્તિ ν અને અચળ તીવ્રતા I_1 નો પ્રકાશ આપાત કરીએ. ત્યાર બાદ આપણે પ્લેટ Aના ધન સ્થિતિમાનને ધીમે ધીમે બદલીએ તથા દરેક વખતે મળતો ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ માપીએ. એમ જાણવા મળે છે કે પ્રવેગક (ધન) સ્થિતિમાનના વધારા સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ પણ વધે છે. કોઈ એક તબક્કે પ્લેટ A પરના ચોક્કસ ધન સ્થિતિમાન માટે, ઉત્સર્જાયેલા બધા જ ઈલેક્ટ્રૉન પ્લેટ A પર પહોંચી જાય છે અને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ મહત્તમ બને છે અથવા સંતૃપ્ત (Saturate) થાય છે. જો આપણે પ્લેટ A પરનું પ્રવેગક સ્થિતિમાન હજી પણ વધારીએ તો ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ વધતો નથી. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહના આ મહત્તમ મૂલ્યને *સંતૃપ્ત પ્રવાહ* (*Saturation Current*) કહે છે. સંતૃપ્ત પ્રવાહ, ઉત્સર્જક પ્લેટ C પરથી ઉત્સર્જાયેલા બધા જ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન કલેક્ટર પ્લેટ A પર પહોંચે તે કિસ્સાને અનુરૂપ છે (તે કિસ્સામાં મળે છે).

હવે આપણે પ્લેટ Cની સાપેક્ષે પ્લેટ A પર ઋણ (પ્રતિપ્રવેગક) સ્થિતિમાન લગાડીએ અને તેને ધીમે ધીમે વધુ ઋણ બનાવીએ. જ્યારે ધ્રુવત્વ ઊલટાવવામાં આવે ત્યારે ઈલેક્ટ્રૉન અપાકર્ષાય છે અને ફક્ત

પુરતી ઊર્જા ધરાવતા ઈલેક્ટ્રૉન જ કલેક્ટર પ્લેટ A સુધી પહોંચે છે. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ ઝડપથી ઘટતો જાય છે અને પ્લેટ A પરના ઋણ સ્થિતિમાનના ચોક્કસ રીતે વ્યાખ્યાયિત ક્રાંતિમૂલ્ય, V_0 માટે તે શૂન્ય થાય છે. આપાત પ્રકાશની કોઈ ચોક્કસ આવૃત્તિ માટે, *પ્લેટ A પર લગાડેલ લઘુત્તમ ઋણ (પ્રતિપ્રવેગી) સ્થિતિમાન V_0, કે જેના માટે ફોટો પ્રવાહ બંધ થઈ જાય કે શૂન્ય થાય, તેને કટ ઓફ કે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ કહે છે.*

ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનના સંદર્ભમાં આ અવલોકનનું અર્થઘટન સરળ છે. ધાતુમાંથી ઉત્સર્જાયેલા બધા જ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા એક સમાન નથી હોતી. જ્યારે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ એટલું પુરતું હોય કે જે સૌથી વધુ ઊર્જાવાન ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન, કે જેમની મહત્તમ ગતિઊર્જા (K_{max}) હોય, તેમને પણ અપાકર્ષિત કરીને કલેક્ટર પર પહોંચવામાંથી રોકી શકે, ત્યારે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ શૂન્ય થાય છે, તેથી

$$K_{max} = eV_0 \qquad (11.1)$$

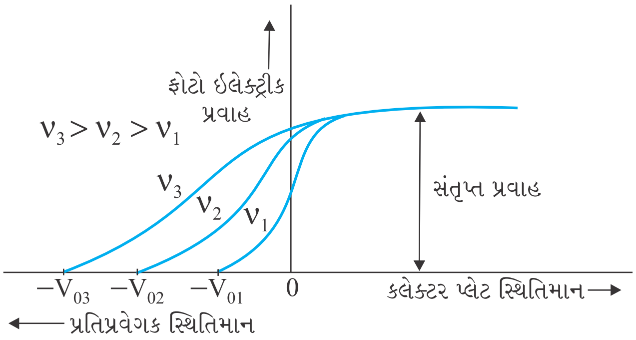


આકૃતિ 11.3 આપાત પ્રકાશની જુદી જુદી તીવ્રતાઓ માટે, કલેક્ટર પ્લેટ સ્થિતિમાન સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહનો ફેરફાર

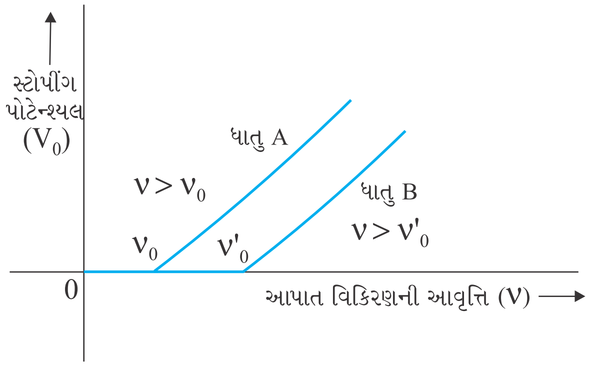
આપણે આ પ્રયોગને આપાત વિકિરણની તે જ આવૃત્તિ માટે, પણ વધુ તીવ્રતાઓ I_2 અને I_3 ($I_3 > I_2 > I_1$) માટે ફરીથી કરી શકીએ. આપણે એ નોંધીએ કે, સંતૃપ્ત પ્રવાહો (Saturation Currents) હવે વધારે ઊંચા મૂલ્યના મળે છે. આ દર્શાવે છે કે, આપાત વિકિરણની તીવ્રતાને સપ્રમાણ રીતે એક સેકન્ડ દીઠ વધુ ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થાય છે. પરંતુ આકૃતિ 11.3માં આલેખીય રીતે દર્શાવ્યા મુજબ સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલનું મૂલ્ય આપાત વિકિરણની તીવ્રતા I_1 માટે મળતું હતું તેટલું જ રહે છે. આમ, *આપાત વિકિરણની આપેલ આવૃત્તિ માટે, સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ એ તીવ્રતા પર આધાર રાખતું નથી.* બીજા શબ્દોમાં, ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા પ્રકાશની આવૃત્તિ અને ઉત્સર્જક પ્લેટના દ્રવ્ય પર આધાર રાખે છે, પરંતુ તે આપાત વિકિરણની તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી.

11.4.3 આપાત વિકિરણની આવૃત્તિની સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ પર અસર (Effect of Frequency of Incident Radiation on Stopping Potential)

હવે આપણે આપાત વિકિરણની આવૃતિ ν અને સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ V_0 વચ્ચેનો સંબંધ સમજીશું. આપણે જુદી જુદી આવૃત્તિઓ માટે પ્રકાશના કિરણોની તીવ્રતા એક સરખી જ રાખીશું અને કલેક્ટર પ્લેટના સ્થિતિમાન સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રિક પ્રવાહના ફેરફારનો અભ્યાસ કરીશું. પરિણામે મળતો ફેરફાર આકૃતિ 11.4માં દર્શાવ્યો છે. આપણને આપાત વિકિરણની જુદી જુદી આવૃત્તિઓ માટે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલના જુદા જુદા મૂલ્યો મળે છે. પરંતુ સંતૃપ્ત પ્રવાહ (Saturation Current)નું એક સમાન મૂલ્ય જ મળે છે. ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા, આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ પર આધાર રાખે છે. આપાત વિકિરણની ઊંચી આવૃત્તિઓ માટે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ વધુ ઋણ હોય છે. આકૃતિ 11.4



આકૃતિ 11.4 આપાત પ્રકાશની જુદી જુદી આવૃત્તિઓ માટે કલેક્ટર પ્લેટ સ્થિતિમાન સાથે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહનો ફેરફાર



આકૃતિ 11.5 આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય માટે આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ ν સાથે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ V_0નો ફેરફાર

પરથી નોંધો કે, જો આવૃત્તિઓ $\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$ ક્રમમાં હોય તો સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ $V_{03} > V_{02} > V_{01}$ ક્રમમાં છે. આ દર્શાવે છે કે, આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ જેમ વધુ, તેમ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિઊર્જા પણ વધુ. પરિણામ સ્વરૂપે, તેમને પુરેપુરા અટકાવવા માટે વધુ પ્રતિપ્રવેગક સ્થિતિમાન (Retarding potential)ની જરૂર પડે. જો આપણે જુદી જુદી ધાતુઓ માટે આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ અને તેને અનુરૂપ સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલનો આલેખ દોરીએ તો આપણને આકૃતિ 11.5માં દર્શાવ્યા મુજબ સીધી રેખા મળે. આલેખ દર્શાવે છે કે,

(i) આપેલ ફોટો સેન્સિટીવ (પ્રકાશ સંવેદી) દ્રવ્ય માટે આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ સાથે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ રેખીય રીતે બદલાય છે.

(ii) કોઈ ચોક્કસ લઘુત્તમ કટ ઓફ આવૃત્તિ ν_0 માટે સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ શૂન્ય હોય છે.

આ અવલોકનો બે બાબતો સૂચવે છે :

(i) *ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ સાથે રેખીય રીતે બદલાય છે, પરંતુ તે તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી.*

(ii) *જો આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ ν કટ ઓફ આવૃત્તિ ν_0 કરતાં ઓછી હોય તો તીવ્રતા ગમે તેટલી વધુ હોય તો પણ કોઈ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન થતું નથી.*

આ લઘુત્તમ કટ ઓફ આવૃત્તિ ν_0ને *થ્રેશોલ્ડ (સીમાંત) આવૃત્તિ* કહે છે. જુદી જુદી ધાતુઓ માટે તે જુદી જુદી હોય છે.

જુદા જુદા પ્રકાશ સંવેદી (ફોટો સેન્સિટીવ) દ્રવ્યો પ્રકાશને જુદો જુદો પ્રતિભાવ આપે છે. ઝિંક અને તાંબા કરતાં સેલિનિયમ વધુ સંવેદનશીલ છે. એક જ પ્રકાશ-સંવેદી પદાર્થ જુદી જુદી તરંગલંબાઈના પ્રકાશને પણ જુદો જુદો પ્રતિભાવ આપે છે. ઉદાહરણ તરીકે અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ તાંબામાં ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર ઉપજાવે છે જ્યારે લીલા કે લાલ રંગનો પ્રકાશ આ અસર ઉપજાવતો નથી.

નોંધો કે ઉપરના બધા પ્રયોગોમાં, એ જાણવા મળ્યું છે કે, જો આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કરતાં વધુ હોય તો જરા પણ દેખીતો સમય બગાડ્યા વગર (જવા દીધા વગર) ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન તત્કાળ શરૂ થઈ જાય છે, પછી ભલેને આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા ઘણી ઓછી હોય. હવે એ જાણવા મળ્યું છે કે, 10^{-9} s કે તેથી ઓછા ક્રમના સમયમાં ઉત્સર્જન શરૂ થાય છે.

હવે આપણે આ વિભાગમાં દર્શાવેલી પ્રાયોગિક લાક્ષણિકતાઓ અને અવલોકનોનો સારાંશ જોઈએ.

(i) આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય અને આપાત વિકિરણની આપેલ આવૃત્તિ (થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કરતાં વધુ) માટે, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ આપાત પ્રકાશની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે (આકૃતિ 11.2).

(ii) આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય અને આપેલ આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ માટે, સંતૃપ્ત પ્રવાહ આપાત વિકિરણની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે પરંતુ સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ તીવ્રતાથી સ્વતંત્ર હોય છે (આકૃતિ 11.3).

(iii) આપેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્ય માટે, આપાત પ્રકાશની એક ચોક્કસ લઘુત્તમ કટ ઓફ આવૃત્તિ હોય છે, જેને *થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ* કહે છે, તેના કરતાં ઓછી આવૃત્તિ માટે ગમે તેટલી ઊંચી તીવ્રતાનો પ્રકાશ હોય તો પણ, ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉત્સર્જન થતું નથી. થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિથી વધુ આવૃત્તિ માટે, સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ અથવા સમતુલ્ય રીતે ઉત્સર્જિત ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા, આપાત વિકિરણની આવૃત્તિ સાથે રેખીય રીતે વધે છે, પરંતુ તે તીવ્રતા પર આધારિત નથી (આકૃતિ 11.5).

(iv) ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન એ કોઈ પણ દેખીતો સમય બગાડ્યા વગર (જવા દીધા વિના) ($\sim 10^{-9}$ s કે તેથી ઓછા સમયમાં) થતી તાત્ક્ષણિક ઘટના છે, પછી ભલેને આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા અતિશય ક્ષીણ હોય.

11.5 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર અને પ્રકાશનો તરંગવાદ (PHOTOELECTRIC EFFECT AND WAVE THEORY OF LIGHT)

ઓગણીસમી સદીના અંત સુધીમાં પ્રકાશ તરંગ સ્વરૂપે છે એ બાબત સ્થાપિત થઈ ગઈ હતી. વ્યતિકરણ, વિવર્તન અને ધ્રુવીભવન (Polarisation)ની ઘટનાઓ પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપ દ્વારા કુદરતી અને સંતોષજનક રીતે સમજાવી શકાઈ હતી. આ ખ્યાલ મુજબ પ્રકાશ એ વિદ્યુત અને ચુંબકીય ક્ષેત્રોથી બનતું વિદ્યુતચુંબકીય તરંગ છે અને તે અવકાશના જે વિભાગમાં વિસ્તરેલું હોય તે વિસ્તાર પર ઊર્જાનું સતત વિતરણ હોય છે. હવે આપણે એ જોવા પ્રયત્ન કરીએ કે પ્રકાશનું આ તરંગ સ્વરૂપ અગાઉના પરિચ્છેદમાં દર્શાવેલ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનના અવલોકનો સમજાવી શકે છે કે નહી.

પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપ મુજબ, ધાતુની (જેના પર વિકિરણની કિરણાવલિ પડે છે તેની) સપાટી પર રહેલા ઈલેક્ટ્રૉન્સ વિકિરણની ઊર્જા સતત શોષે છે. આપાત વિકિરણની તીવ્રતા જેમ વધુ તેમ વિદ્યુત ચુંબકીય ક્ષેત્રોના કંપવિસ્તાર (Amplitude) વધુ હોય છે. પરિણામે તીવ્રતા જેટલી વધુ, તેટલી જ વધુ ઊર્જા દરેક ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા શોષાય છે. આ ચિત્ર મુજબ, સપાટી પરના ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા, પ્રકાશની તીવ્રતાના વધારા સાથે વધવી જોઈએ. વળી, (આપાત) પ્રકાશની આવૃત્તિ ગમે તે હોય તો પણ પુરતી તીવ્રતાવાળી વિકિરણની કિરણાવલિ (પુરતા સમયમાં) ઈલેક્ટ્રૉનને પુરતી ઊર્જા આપી શકવી જોઈએ કે જેથી તેઓ ધાતુની સપાટીમાંથી મુક્ત થવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જા કરતાં વધુ ઊર્જા મેળવે. આથી થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિનું અસ્તિત્વ જરૂરી નથી. તરંગ સ્વરૂપની અપેક્ષાઓ પરિચ્છેદ 11.4.3ના અંતમાં મળેલ અવલોકનો (i), (ii) અને (iii)થી વિરુદ્ધ છે.

આ ઉપરાંત આપણે નોંધવું જોઈએ કે, તરંગવાદમાં ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા ઊર્જાનું શોષણ વિકિરણના સમગ્ર તરંગ અગ્ર પર સતત થવું જોઈએ. ખુબ મોટી સંખ્યાના ઈલેક્ટ્રૉન ઊર્જાનું શોષણ કરતાં હોવાથી એકમ સમયમાં ઈલેક્ટ્રૉન દીઠ શોષાયેલી ઊર્જા ઘણી ઓછી હોય છે. સ્પષ્ટ ગણતરીઓ પરથી અંદાજ મેળવી શકાય કે એક ઈલેક્ટ્રૉનને કાર્ય વિધેયથી વધુ પૂરતી ઊર્જા મેળવીને ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર આવવા માટે ઘણા કલાકો કે તેથી વધુ સમયની જરૂર પડે. આ તારણ પણ તાત્ક્ષણિક ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન માટેના અવલોકન (iv)થી તદન વિરુદ્ધ છે. ટુંકમાં તરંગ સ્વરૂપ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરના મૂળભૂત લક્ષણો સમજાવવા માટે અસમર્થ છે.

11.6 આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ : વિકિરણ ઊર્જાનો ક્વૉન્ટમ (Einstein's Photoelectric Equation : Energy Quantum of Radiation)

1905માં આલ્બર્ટ આઈન્સ્ટાઈને (1879-1955) ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર સમજાવવા માટે વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણનો નવો વાદ રજૂ કર્યો. આ વાદ મુજબ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન વિકિરણમાંથી ઊર્જાના સતત શોષણને કારણે થતું નથી. વિકિરણ ઊર્જા છુટા છવાયા (અસતત) એકમોની બનેલી હોય છે જેને *વિકિરણની ઊર્જાનો ક્વૉન્ટમ* કહે છે. વિકિરણ ઊર્જાના દરેક ક્વૉન્ટમની ઊર્જા $h\nu$ જેટલી હોય છે. જ્યાં, h એ પ્લાન્કનો અચળાંક છે અને ν પ્રકાશની આવૃત્તિ છે. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરમાં ઈલેક્ટ્રૉન

આલ્બર્ટ આઈન્સ્ટાઈન (Albert Einstein-1879-1955)

આલ્બર્ટ આઈન્સ્ટાઈન (Albert Einstein-1879-1955) સર્વકાલિન મહાન ભૌતિકવિજ્ઞાનીઓમાંના એક એવા આઈન્સ્ટાઈન, ઉલ્મ (Ulm), જર્મનીમાં જન્મ્યા હતાં. 1905માં તેમણે નવો ચીલો ચાતરતા ત્રણ લેખ પ્રકાશિત કર્યા. પહેલા લેખમાં તેમણે પ્રકાશના કણ સ્વરૂપ (જેને હવે ફોટોન કહીએ છીએ)નો ખ્યાલ રજૂ કર્યો અને તેમની લાક્ષણિકતાનો ઉપયોગ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર સમજાવવા માટે કર્યો. બીજા લેખમાં તેમણે બ્રાઉનીયનગતિ (Brownian Motion)નો સિદ્ધાંત વિકસાવ્યો. જે થોડા વર્ષો બાદ પ્રાયોગિક રીતે સાચો ઠર્યો અને તેણે દ્રવ્યના પરમાણુ સ્વરૂપનો સચોટ પુરાવો પુરો પાડ્યો. ત્રીજા લેખ દ્વારા વિશિષ્ટ સાપેક્ષવાદના સિદ્ધાંતની શોધ થઈ. 1916માં તેમણે સાપેક્ષવાદનો વ્યાપક (General) સિદ્ધાંત પ્રકાશિત કર્યો. આઈન્સ્ટાઈનના ત્યાર પછીના ખૂબ અગત્યના પ્રદાનો આ મુજબ છે : પ્લાન્કના સંપૂર્ણ કાળા પદાર્થ દ્વારા ઉત્સર્જાતા વિકિરણને બીજી રીતે સમજાવવા ઉદ્દીપ્ત ઉત્સર્જન (Stimulated Emission)ની કલ્પના, બ્રહ્માંડની ઉત્પતિ અંગે આધુનિક કોસ્મોલોજીની શરૂઆત કરનાર સ્થિત મોડલ, દળદાર બોઝોન્સના વાયુ માટે ક્વૉન્ટમ આંકડાશાસ્ત્ર (Quantum Statistics) અને ક્વૉન્ટમ યંત્ર શાસ્ત્રના પાયાના સિદ્ધાંતો માટેનું વિવેચનપૂર્ણ વિશ્લેષણ. 1921માં તેમને સૈદ્ધાંતિક ભૌતિકવિજ્ઞાન અને ફોટોઈલેક્ટ્રીક અસર માટે નૉબેલ પારિતોષીક એનાયત કરવામાં આવ્યું હતું.

વિકિરણના ($h\nu$) ઊર્જાના ક્વૉન્ટમનું શોષણ કરે છે. જો શોષાયેલા ક્વૉન્ટમની ઊર્જા, ઈલેક્ટ્રૉનને ધાતુની સપાટીમાંથી મુક્ત કરવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જા (કાર્ય વિધેય ϕ_0) કરતાં વધુ હોય તો ઈલેક્ટ્રૉન મહત્તમ ગતિ ઊર્જા

$$K_{max} = h\nu - \phi_0 \qquad (11.2)$$

સાથે ઉત્સર્જન પામે છે.

વધુ પ્રબળ રીતે બંધીત ઈલેક્ટ્રૉન મહત્તમ ગતિઊર્જાથી ઓછી ઊર્જા સાથે બહાર નીકળશે. નોંધો કે આપેલ આવૃત્તિ માટે એક સેકન્ડમાં આપાત થતાં ફોટોનની સંખ્યા પ્રકાશની તીવ્રતાને નક્કી કરે છે. (પ્રકાશની) તીવ્રતા વધારતાં એક સેકન્ડ દીઠ ઉત્સર્જાયેલા ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા પણ વધે છે. આમ છતાં ઉત્સર્જાયેલા ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા દરેક ફોટોનની ઊર્જા વડે નક્કી થાય છે.

સમીકરણ 11.2ને *આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ* કહે છે. આપણે હવે જોઈશું કે આ સમીકરણ પેટા પરિચ્છેદ 11.4.3ના અંતભાગમાં દર્શાવેલ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર માટેના બધા અવલોકનોને સરળતા અને સચોટતાપૂર્વક કેવી રીતે સમજાવે છે.

- સમીકરણ (11.2) મુજબ K_{max} , ν પર રેખીય રીતે આધારિત છે અને વિકિરણની તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી, જે અવલોકન સાથે સહમતી દર્શાવે છે. આમ થાય છે કારણકે આઈન્સ્ટાઈનના સિદ્ધાંત મુજબ વિકિરણના એક ફોટોનના, એક ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા શોષણ દરમિયાન ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર ઉદ્ભવે છે. વિકિરણની તીવ્રતા (જે એકમ સમયમાં, એકમ ક્ષેત્રફળ પર આપાત થતા ઊર્જા ક્વૉન્ટમની સંખ્યાના સમપ્રમાણમાં હોય છે) આ મૂળ પ્રક્રિયામાં અસંગત (Irrelevant) (બિન અસરકારક) છે.
- K_{max} અ-ઋણ (non-negative)હોવું જોઈએ. આથી સમીકરણ (11.2) સૂચવે છે કે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન ત્યારે જ શક્ય બને કે જ્યારે

  $h\nu > \phi_0$

  અથવા $\nu > \nu_0$, જ્યાં

  $$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h} \qquad (11.3)$$

  સમીકરણ (11.3) દર્શાવે છે કે જેમ કાર્ય વિધેય ϕ_0 વધુ હોય તેમ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનને ઉત્સર્જિત કરવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ કે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ ν_0 વધારે ઊંચી હોય છે. આમ ધાતુની સપાટી માટે એક થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ $\nu_0(=\phi_0/h)$ હોય છે કે જેનાથી નીચેની આવૃત્તિ માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન શક્ય નથી, પછી ભલેને આપાત વિકિરણની તીવ્રતા ગમે તેટલી હોય કે ગમે તેટલા સમય સુધી તે સપાટી પર આપાત થાય.
- આ વાદમાં ઉપર નોંધ્યું તેમ વિકિરણની તીવ્રતા, એકમ સમયમાં એકમ ક્ષેત્રફળ પર આપાત થતા ઊર્જા ક્વૉન્ટમની સંખ્યાના સમપ્રમાણમાં હોય છે. જેટલી વધુ સંખ્યાનાં ઊર્જા ક્વૉન્ટમ મળતા હોય તેટલી વધુ સંખ્યાના ઈલેક્ટ્રૉન આ ઊર્જા ક્વૉન્ટમ શોષે અને પરિણામે ધાતુમાંથી ($\nu > \nu_0$માટે) વધુ સંખ્યાના ઈલેક્ટ્રૉન બહાર આવે (ઉત્સર્જિત થાય). આ બાબત $\nu > \nu_0$ માટે, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં કેમ હોય છે, તે સમજાવે છે.

- આઈન્સ્ટાઈનના વાદ મુજબ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરમાં સંકળાયેલી પ્રાથમિક પ્રક્રિયા એ ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા પ્રકાશ ક્વૉન્ટમનું શોષણ છે. આ પ્રક્રિયા તાત્ક્ષણિક છે. આમ તીવ્રતા, એટલે કે એકમ સમયમાં એકમ ક્ષેત્રફળ દીઠ (આપાત) વિકિરણના ક્વૉન્ટમની સંખ્યા, કોઈ પણ હોય પણ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન તાત્ક્ષણિક હોય છે. તીવ્રતા ઓછી હોય એનો અર્થ એ નહીં કે ઉત્સર્જન મોડું થાય. કારણ કે મૂળભૂત પ્રાથમિક પ્રક્રિયા તો એ જ છે. તીવ્રતા ફક્ત એટલું જ નક્કી કરે છે કે આ પ્રાથમિક પ્રક્રિયા (એકલ ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા પ્રકાશ ક્વૉન્ટમનું શોષણ) માં કેટલા ઈલેક્ટ્રૉન ભાગ લઈ શકશે અને તેથી, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ રચશે.

સમીકરણ (11.1)નો ઉપયોગ કરતાં, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ (11.2), આ મુજબ લખી શકાય.

$$eV_0 = h\nu - \phi_0 ;\ \nu > \nu_0 \text{ માટે}$$

$$\text{અથવા } V_0 = \left(\frac{h}{e}\right)\nu - \frac{\phi_0}{e} \tag{11.4}$$

આ એક અગત્યનું પરિણામ છે. તે દર્શાવે છે કે V_0 વિરુદ્ધ νનો વક્ર (આલેખ) સીધી રેખા છે. જેનો ઢાળ = (h/e) છે, જે દ્રવ્યના પ્રકાર પર આધાર રાખતો નથી. 1906-1916 દરમિયાન આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ ખોટું છે તે નક્કી કરવા, મિલિકને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર માટે શ્રેણીબધ્ધ પ્રયોગો કર્યા. તેમણે આકૃતિ 11.5માં દર્શાવ્યા મુજબ સોડિયમ માટે મળતી સીધી રેખાનો ઢાળ શોધ્યો. eના જાણીતા મૂલ્ય પરથી તેમણે પ્લાન્કના અચળાંક hનું મૂલ્ય શોધ્યું. તદ્દન જુદી રીતે મેળવેલ આ મૂલ્ય પ્લાન્કના અચળાંક ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ J s)ના મૂલ્યની ખૂબ જ નજીકનું હતું. આ રીતે 1916માં આઈન્સ્ટાઈનના સમીકરણને ખોટું સાબિત કરવા જતા મિલિકને આ સમીકરણની સત્યતા સાબિત કરી.

પ્રકાશ ક્વૉન્ટમના અધિતર્કનો ઉપયોગ કરીને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરની સફળતાપૂર્વકની સમજૂતી તથા h અને ϕ_0ના પ્રાયોગિક રીતે માપેલ મૂલ્યોની બીજા પ્રયોગો સાથે સામ્યતા દ્વારા આઈન્સ્ટાઈનની ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરની સમજૂતીને માન્યતા મળી. મિલિકને ઘણી બધી આલ્કલી ધાતુઓ માટે વિકિરણની ઘણી મોટી આવૃત્તિના અંતરાલ માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણની સત્યતા ઘણી ચોક્સાઈપૂર્વક ચકાસી.

11.7 પ્રકાશનું કણ સ્વરૂપ : ફોટોન (Particle Nature of Light : The Photon)

ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરે એવી વિચિત્ર હકીકતનો પૂરાવો આપ્યો કે, જ્યારે પ્રકાશ દ્રવ્ય સાથે આંતરક્રિયા કરે ત્યારે તે જાણે કે ઊર્જાના અમુક જથ્થાઓ કે ક્વૉન્ટમનો બનેલો હોય, જે દરેકની ઊર્જા $h\nu$ જેટલી હોય.

શું પ્રકાશના ક્વૉન્ટમની ઊર્જાને કણ સાથે સાંકળી શકાય ? આઈન્સ્ટાઈને એક અગત્યનું પરિણામ એ તારવ્યું કે પ્રકાશ ક્વૉન્ટમને વેગમાન ($h\nu/c$) સાથે સાંકળી શકાય. ઊર્જા અને વેગમાનનું ચોક્કસ મૂલ્ય સ્પષ્ટ રીતે દર્શાવે છે કે, પ્રકાશના ક્વૉન્ટમને કણ સાથે સાંકળી શકાય. આ કણને પછીથી *ફોટોન* નામ આપવામાં આવ્યું. પ્રકાશના કણ સ્વરૂપનો હજુ બીજો પુરાવો 1924માં, એ. એચ. કોમ્પ્ટન (A. H. Compton, 1892-1962)ના ઈલેક્ટ્રૉન્સ દ્વારા ક્ષ-કિરણોના પ્રકીર્ણનના પ્રયોગો દ્વારા મળ્યો. 1921માં આઈન્સ્ટાઈનને તેમના સૈદ્ધાંતિક ભૌતિકવિજ્ઞાન અને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર માટેના યોગદાન બદલ નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત કરવામાં આવ્યું. 1923માં મિલિકનને પ્રાથમિક વિદ્યુતભાર (નું મૂલ્ય શોધવા બદલ) અને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર પરના કાર્ય બદલ નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત થયું.

આપણે વિદ્યુત ચુંબકીય વિકિરણનાં ફોટોન સ્વરૂપને સંક્ષેપમાં આ રીતે દર્શાવી શકીએ.

(i) વિકિરણની દ્રવ્ય સાથેની આંતરક્રિયા દરમિયાન, વિકિરણ જાણે કે કણ હોય તેમ વર્તે છે જેને ફોટોન કહે છે.

(ii) દરેક ફોટોનની ઊર્જા E $(=h\nu)$ અને વેગમાન p $(=h\nu/c)$ છે, જ્યારે ઝડપ, પ્રકાશની ઝડપ c જેટલી છે.

(iii) ν જેટલી આવૃત્તિ, અને λ તરંગલંબાઈ ધરાવતા પ્રકાશના બધા જ ફોટોનની ઊર્જા E $(=h\nu=hc/\lambda)$ તથા વેગમાન p $(=h\nu/c=h/\lambda)$ છે, પછી ભલેને તીવ્રતા ગમે તેટલી હોય. આપેલ તરંગ લંબાઈના પ્રકાશની તીવ્રતા વધારતાં, એકમ સમયમાં આપેલ ક્ષેત્રફળમાંથી પસાર થતા ફોટોનની સંખ્યા વધે છે, આ દરેક ફોટોનની ઊર્જા સમાન હોય છે. આમ ફોટોનની ઊર્જા વિકિરણની તીવ્રતા પર આધાર રાખતી નથી.

(iv) ફોટોન વિદ્યુતની દૃષ્ટિએ તટસ્થ છે અને તેઓ વિદ્યુત કે ચુંબકીય ક્ષેત્રો વડે વિચલન અનુભવતા નથી.

(v) ફોટોન-કણ સંઘાત (અથડામણ) (જેમકે ફોટોન-ઈલેક્ટ્રૉન અથડામણ)માં કુલ ઊર્જા અને કુલ વેગમાનનું સંરક્ષણ થાય છે. આમ છતાં અથડામણ દરમિયાન ફોટોનની સંખ્યાનું સંરક્ષણ ન પણ થાય. ફોટોન કદાચ શોષાઈ જાય અથવા નવા ફોટોનનું ઉત્સર્જન પણ થાય.

ઉદાહરણ 11.1

ઉદાહરણ 11.1 લેસર વડે 6.0×10^{14} Hz આવૃત્તિનો એકરંગી પ્રકાશ ઉત્પન્ન થાય છે. ઉત્સર્જાયેલ પાવર 2.0×10^{-3} W છે. (a) પ્રકાશની કિરણાવલિ (beam) માં રહેલા ફોટોનની ઊર્જા કેટલી હશે ? (b) ઊર્જા સ્રોત દ્વારા સરેરાશ રીતે એક સેકન્ડ દીઠ કેટલા ફોટોન ઉત્સર્જાતા હશે ?

ઉકેલ

(a) દરેક ફોટોનની ઊર્જા

$$E = h\nu = (6.63\times10^{-34}\ \text{J s})(6.0\times10^{14}\ \text{Hz})$$

$$= 3.98\times10^{-19}\ \text{J}$$

(b) જો ઉદ્‌ગમમાંથી એક સેકન્ડ દીઠ N સંખ્યાના ફોટોન ઉત્સર્જિત થતા હોય, તો કિરણાવલિમાંથી પસાર થતો પાવર; ફોટોન દીઠ ઊર્જા E ના N ગણો, જેથી P = NE. આથી,

$$N = \frac{P}{E} = \frac{2.0\times10^{-3}\ \text{W}}{3.98\times10^{-19}\ \text{J}}$$

$$= 5.0\times10^{15}\ \text{ફોટોન/સેકન્ડ}$$

ઉદાહરણ 11.2

ઉદાહરણ 11.2 સિઝિયમનું કાર્ય વિધેય 2.14 eV છે.

(a) સિઝિયમની થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ શોધો, અને (b) જો 0.60 V ના સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ દ્વારા ફોટો પ્રવાહ શૂન્ય થતો હોય તો આપાત પ્રકાશની તરંગલંબાઈ શોધો.

ઉકેલ

(a) કટ ઓફ કે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ માટે, આપાત વિકિરણની ઊર્જા $h\nu_0$, કાર્ય વિધેય ϕ_0 જેટલી હોવી જોઈએ, જેથી

$$\nu_0 = \frac{\phi_0}{h} = \frac{2.14\,eV}{6.63\times10^{-34}\ \text{J s}}$$

$$= \frac{2.14\times1.6\times10^{-19}\ \text{J}}{6.63\times10^{-34}\ \text{J s}} = 5.16\times10^{14}\ \text{Hz}$$

આમ, આ થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કરતાં ઓછી આવૃત્તિઓ માટે, ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થતા નથી.

(b) પ્રતિ પ્રવેગી સ્થિતિમાન V_0 દ્વારા eV_0 જેટલી સ્થિતિઊર્જા, ઉત્સર્જિત ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા જેટલી થાય ત્યારે ફોટો પ્રવાહ શૂન્ય થાય છે. આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ

$$eV_0 = h\nu - \phi_0 = \frac{hc}{\lambda} - \phi_0$$

અથવા $\lambda = hc/(eV_0 + \phi_0)$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{34} \text{J s}) \times (3 \times 10^8 \text{m/s})}{(0.60 \text{ eV} + 2.14 \text{ eV})} = \frac{19.89 \times 10^{-26} \text{J m}}{(2.74 \text{ eV})}$$

$$\lambda = \frac{19.89 \times 10^{-26} \text{ J m}}{2.74 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{J}} = 454 \text{ nm}$$

ઉદાહરણ 11.2

ઉદાહરણ 11.3 દૃશ્ય પ્રકાશ વિસ્તારમાં જાંબલી રંગની તરંગલંબાઈ 390 nm છે, પીળા-લીલા પ્રકાશ માટે લગભગ 550 nm (સરેરાશ તરંગલંબાઈ) અને લાલ રંગ માટે લગભગ 760 nm છે.

(a) દૃશ્ય પ્રકાશ વિસ્તારમાં (i) જાંબલી છેડે, (ii) પીળા-લીલા રંગની સરેરાશ તરંગલંબાઈ આગળ અને (iii) લાલ છેડે, ફોટોનની ઊર્જા (*e*V)માં કેટલી હશે ? ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ J s અને 1 *e*V $= 1.6 \times 10^{-19}$ J લો.)

(b) કોષ્ટક 11.1માં દર્શાવેલ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્યોના કાર્ય વિધેયો અને (a)માં મેળવેલ (i), (ii) અને (iii)ના પરિણામો પરથી તમે એવી પ્રકાશ સંવેદી રચના બનાવી શકો કે જે દ્રશ્ય પ્રકાશ સાથે કાર્ય કરે ?

ઉકેલ

(a) આપાત ફોટોનની ઊર્જા, $E = h\nu = hc/\lambda$

$$E = (6.63 \times 10^{-34} \text{J s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})/\lambda$$

$$= \frac{1.989 \times 10^{-25} \text{J m}}{\lambda}$$

(i) જાંબલી રંગ માટે $\lambda_1 = 390$ nm (ટૂંકી તરંગલંબાઈનો છેડો)

$$\text{આપાત ફોટોનની ઊર્જા, } E_1 = \frac{1.989 \times 10^{-25} \text{J m}}{390 \times 10^{-9} \text{m}} = 5.10 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$= \frac{5.10 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 3.19 \, eV$$

(ii) પીળા-લીલા પ્રકાશ માટે, $\lambda_2 = 550$ nm (સરેરાશ તરંગલંબાઈ)

$$\text{આપાત ફોટોનની ઊર્જા } E_2 = \frac{1.989 \times 10^{-25} \text{ J m}}{550 \times 10^{-9} \text{m}}$$

$$= 3.62 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.26 \, eV$$

(iii) લાલ પ્રકાશ માટે, $\lambda_3 = 760$ nm (મોટી તરંગલંબાઈનો છેડો)

$$\text{આપાત ફોટોનની ઊર્જા, } E = \frac{1.989 \times 10^{-25} \text{ J m}}{760 \times 10^{-9} \text{m}}$$

$$= 2.62 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.64 \, eV$$

(b) ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સાધનના કાર્ય માટે, આપાત પ્રકાશની ઊર્જા E, દ્રવ્યના કાર્યવિધેય ϕ_0 જેટલી કે તેથી વધુ હોવી જોઈએ. આમ, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સાધન જાંબલી પ્રકાશ (ઊર્જા $E = 3.19$ *e*V) સાથે પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્યો *Na* (જેનું $\phi_0 = 2.75$ *e*V), K (જેનું $\phi_0 =$ 2.30 *e*V) અને *Cs* (જેનું $\phi_0 = 2.14$ *e*V) માટે જ કાર્ય કરશે. તે પીળા-લીલા પ્રકાશ ($E = 2.26$ *e*V) સાથે ફક્ત *Cs* (જેનું $\phi_0 = 2.14$ *e*V) માટે જ કાર્ય કરશે. પરંતુ, લાલ પ્રકાશ (જેની $E = 1.64$ *e*V) માટે તે આમાંથી એક પણ પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્યો માટે કાર્ય કરશે નહીં.

ઉદાહરણ 11.3

11.8 દ્રવ્યનું તરંગ સ્વરૂપ (WAVE NATURE OF MATTER)

આ પ્રકરણ અને આગળના પ્રકરણોમાં આપણે શીખ્યા તે મુજબ, પ્રકાશ (વ્યાપક રૂપે, વિદ્યુત ચુંબકીય વિકિરણ) દ્વૈત (તરંગ-કણ) સ્વરૂપ ધરાવે છે. વ્યતિકરણ, વિવર્તન અને ધ્રુવીભવનની ઘટનાઓમાં પ્રકાશનું તરંગ સ્વરૂપ જણાય છે. બીજી બાજુ, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર અને કોમ્પ્ટન અસર, જેમાં ઊર્જા અને વેગમાનના ફેરફાર સંકળાયેલા હોય, તેમાં વિકિરણ, ફોટોન્સ-કે જે કણોના જથ્થામાં હોય તે રીતે વર્તે છે. કોઈ પ્રયોગને સમજવા માટે કણ-કે તરંગ સ્વરૂપનો ઉપયોગ કરવો તે પ્રયોગના પ્રકાર પર આધાર રાખે છે. ઉદાહરણ તરીકે, કોઈ પણ પદાર્થને આપણી આંખ દ્વારા જોતી વખતે, બંને પ્રકારનાં વર્ણનો અગત્યનાં છે. આંખની કીકી દ્વારા પ્રકાશનું એકત્રિત થઈને કેન્દ્રીત થવાની પ્રક્રિયા એ તરંગ સ્વરૂપ દ્વારા સારી રીતે સમજી શકાયેલ છે. પરંતુ (આંખના રેટીના-પડદા)માં રહેલી સળીઓ (Rods) (રેશાઓ) તથા શંકુ આકારની ગ્રંથિઓ (Cones) દ્વારા તેનું શોષણ સમજવા માટે પ્રકાશના ફોટોન (કણ) સ્વરૂપની જરૂર પડે છે.

કુદરતી રીતે એક પ્રશ્ન થાય : જો વિકિરણને દ્વૈત (તરંગ-કણ) સ્વરૂપ હોય તો કુદરતમાં રહેલા કણો (જેમકે ઈલેક્ટ્રૉન, પ્રોટોન વગેરે) પણ તરંગ સ્વરૂપ કેમ ન દર્શાવે ? 1924માં ફ્રેન્ચ ભૌતિકવિજ્ઞાની લ્યુઈસ વિકટર ડિ બ્રોગ્લી (Louis Victor de Broglie) (de Broy એમ ઉચ્ચાર થાય છે) (1892-1987) એ સાહસિક (હિંમત ભર્યો) અધિતર્ક રજૂ કર્યો કે દ્રવ્યના ગતિ કરતા કણો યોગ્ય પરિસ્થિતિઓમાં તરંગ જેવી પ્રકૃતિ ધરાવતા હોવા જોઈએ. તેમણે કારણ એ આપ્યું કે પ્રકૃતિ સંમિતિ ધરાવે છે અને બે પ્રાકૃતિક ભૌતિક સ્વરૂપો-દ્રવ્ય અને ઊર્જા, પણ સંમિતિ ધરાવતા હોવા જોઈએ. જો વિકિરણ દ્વૈત રૂપ ધરાવતું હોય તો દ્રવ્ય માટે પણ તેમ થવું જોઈએ. ડિ બ્રોગ્લીએ દર્શાવ્યું કે p વેગમાન ધરાવતા કણ સાથે સંકળાયેલ તરંગલંબાઈ λ, આ મુજબ હોય છે.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\upsilon} \tag{11.5}$$

જ્યાં m એ કણનું દ્રવ્યમાન અને υ તેની ઝડપ છે. સમીકરણ (11.5)ને *ડિ બ્રોગ્લીનું સમીકરણ* કહે છે. અને *દ્રવ્ય તરંગ*ની તરંગ લંબાઈ λને *ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ* કહે છે. દ્રવ્યની દ્વૈત પ્રકૃતિ ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણમાં દેખાઈ આવે છે. સમીકરણ (11.5)ની ડાબી બાજુ, λ એ તરંગ સાથે સંકળાયેલી છે જ્યારે જમણી બાજુ વેગમાન p, કણ સાથે સંકળાયેલું છે. પ્લાન્કનો અચળાંક h આ બંનેને સાંકળે છે.

દ્રવ્ય કણ માટે સમીકરણ (11.5) ફક્ત અધિતર્ક (અનુમાન) છે. જેની સત્યતા પ્રયોગ દ્વારા જ ચકાસી શકાય. છતાં અગત્યની વાત એ છે કે તે ફોટોન માટે પણ સાચું છે. ફોટોન માટે આપણે જોયું હતું કે,

$$p = h\nu / c \tag{11.6}$$

આથી,

$$\frac{h}{p} = \frac{c}{\nu} = \lambda \tag{11.7}$$

એટલે કે સમીકરણ (11.5) વડે દર્શાવવામાં આવેલી ફોટોનની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણની એ તરંગ લંબાઈ સાથે સંકળાયેલી છે. જેનો ફોટોન એ ઊર્જા અને વેગમાનનો ક્વૉન્ટમ છે.

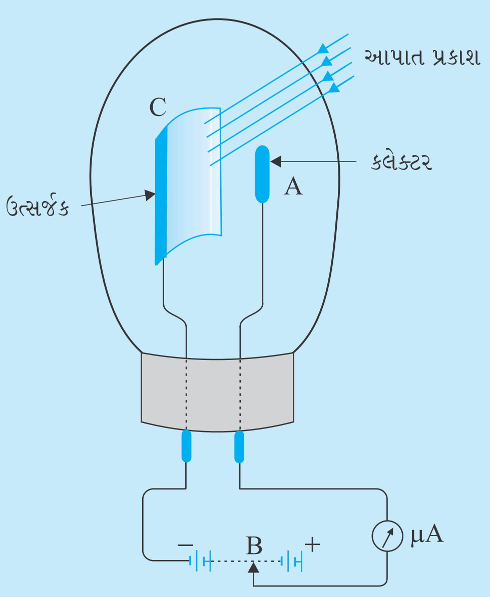
સ્પષ્ટ રૂપે સમીકરણ (11.5) પરથી ભારે કણ (મોટું m) માટે કે વધુ ઊર્જાવાન કણ (મોટો ν) માટે, λ નાની હોય છે. ઉદાહરણ તરીકે 0.12 kg દ્રવ્યમાન અને 20 m s^{-1} ઝડપ ધરાવતા બૉલ માટે ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ સહેલાઈથી ગણી શકાય :

ફોટો સેલ (PHOTO CELL)

ફોટોસેલ એ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરનો ટેક્નોલૉજીકલ ઉપયોગ છે. આ એવું સાધન છે કે જેના વિદ્યુત ગુણધર્મો પ્રકાશ દ્વારા અસર પામે છે. તેને ક્યારેક વિદ્યુતિય આંખ (Electric Eye) પણ કહે છે. ફોટો સેલ એક શૂન્યાવકાશિત કરેલા કાચ કે ક્વાર્ટઝના ગોળા (Bulb)માં ટેકા પર રાખેલ અર્ધનળાકાર પ્રકાશ સંવેદી ધાતુની તક્તી C (ઉત્સર્જક) અને તારના ગૂંચળા (Loop) A (કલેક્ટર)નો બનેલો હોય છે. તેને આકૃતિમાં દર્શાવ્યા મુજબ બાહ્ય પરિપથમાં ઊંચુ વીજદબાણ ધરાવતી (High-tension) બૅટરી B સાથે અને માઈક્રોએમીટર (μA) સાથે જોડેલ હોય છે. કેટલીક વખત, પ્લેટ Cની જગ્યાએ, પ્રકાશ સંવેદી દ્રવ્યનું પાતળું સ્તર બલ્બની અંદર લગાડેલું હોય છે. ગોળાનો કેટલોક ભાગ ચોખ્ખો (પારદર્શક) રહેવા દેવામાં આવે છે કે જેમાંથી પ્રકાશ અંદર દાખલ થઈ શકે.

જ્યારે યોગ્ય તરંગલંબાઈનો પ્રકાશ ઉત્સર્જક C પર આપાત થાય ત્યારે ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થાય છે. આ ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન ક્લેકટર પ્લેટ A પર આકર્ષાય છે. ફોટો સેલ દ્વારા થોડાક માઈક્રોએમ્પિયરના ક્રમનો વિદ્યુતપ્રવાહ સામાન્ય રીતે મળે છે.

ફોટોસેલ પ્રકાશની દીપ્તિતીવ્રતાના ફેરફારને ફોટો પ્રવાહના ફેરફારમાં રૂપાંતરિત કરે છે. આ પ્રવાહનો ઉપયોગ કેટલીક નિયંત્રણ પ્રણાલીઓ અને પ્રકાશ માપતા સાધનોના પ્રચાલનમાં (Operate) થઈ શકે છે. લેડ સલ્ફાઈડનો ફોટો સેલ ઈન્ફ્રારેડ પ્રકાશ માટે સંવેદનશીલ હોય છે જેનો ઉપયોગ ઈલેક્ટ્રૉનીક ઈગ્નીશન પરિપથમાં થાય છે.



ફોટો સેલ

વૈજ્ઞાનિક કાર્યમાં, જ્યાં પણ પ્રકાશની તીવ્રતા માપવી જરૂરી હોય ત્યાં ફોટોસેલનો ઉપયોગ થાય છે. ફોટોગ્રાફીના કેમેરાઓમાં વપરાતા લાઈટ મીટર્સ આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા માપવા માટે ફોટોસેલનો ઉપયોગ કરે છે. દરવાજામાં પ્રકાશ વિદ્યુત પરિપથમાં ફોટોસેલનો ઉપયોગ સ્વચાલિત દરવાજા ખોલવા માટે થાય છે. દરવાજા તરફ જતો વ્યક્તિ ફોટોસેલ પર પડતા પ્રકાશની કિરણાવલિની વચ્ચે આવે છે. ફોટો પ્રવાહમાં અચાનક થતા ફેરફારનો ઉપયોગ દરવાજો ખોલવા માટેની મોટર ચાલુ કરવા માટે કે એલાર્મ વગાડવા માટે થઈ શકે. તેમનો ઉપયોગ (સંખ્યાની) ગણતરી કરતા ગણક સાધનોમાં થાય છે જે પ્રકાશના બીમના માર્ગમાં આવતા (ખલેલ કરતા) માણસ કે કોઈ વસ્તુની નોંધ (રેકોર્ડ) કરતું હોય. આમ, ફોટોસેલનો ઉપયોગ ઑડિટોરિયમમાં દાખલ થતા માણસોની ગણતરી કરવા માટે થાય છે, જો તેઓ હોલમાં એક પછી એક દાખલ થતા હોય તો. તેમનો ઉપયોગ વાહન વ્યવહારના નિયમોનો ભંગ કરતા લોકોને પકડવા માટે થાય છે : જ્યારે પણ (*અદૃશ્ય*) પ્રકાશની કિરણાવલિમાં અડચણ આવે ત્યારે એલાર્મ વાગે. (અદૃશ્ય) એલાર્મમાં દરવાજા પર સ્થાપિત કરેલા ફોટોસેલ પર પારજાંબલી (Ultraviolet) પ્રકાશ સતત આપાત થાય તેવી ગોઠવણ કરેલી હોય છે. ફોટો પ્રવાહમાં થતા અચાનક ફેરફારનો ઉપયોગ વિદ્યુત-ઘંટડી (Bell) વગાડવામાં થાય છે. આગ ફાટી નીકળવાની ઘટનામાં પ્રકાશ કિરણો ફોટોસેલ પર આપાત થાય છે. આ વિદ્યુત-ઘંટડી અથવા સાઈરન સાથેના પરિપથને પૂર્ણ કરે છે જે ચેતવણી સૂચક (Warning Signal) તરીકે કાર્ય કરવાનું શરૂ કરે છે.

ચલચિત્રમાં ધ્વનિના પુનઃ ઉત્પાદનમાં અને ટેલિવિઝન કેમેરામાં દ્રશ્યોના સ્કેનીંગ અને ટેલિકાસ્ટીંગમાં ફોટોસેલ વપરાય છે. ઉદ્યોગોમાં ધાતુના પતરામાં નાની તિરાડ કે છિદ્રોની પરખ કરવામાં ફોટોસેલ વપરાય છે.

$$p = mv = 0.12\,\text{kg} \times 20\,\text{m s}^{-1} = 2.40\,\text{kg m s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\,\text{Js}}{2.40\,\text{kg ms}^{-1}} = 2.76 \times 10^{-34}\,\text{m}$$

તરંગ લંબાઈ એટલી નાની છે કે તે માપી શકાય નહીં. આ કારણથી જ રોજબરોજના જીવનમાં ઉપયોગી એવા સ્થૂળ પદાર્થો તરંગ જેવા ગુણધર્મો દર્શાવતા નથી. બીજી બાજુ, પરમાણુથી નાના વિસ્તારમાં કણોનું તરંગ સ્વરૂપ માપી શકાય તેવું અને મહત્વનું છે.

લુઈસ વિક્ટર ડી બ્રોગ્લી (Louis Victor de Broglie 1892-1987)

લુઈસ વિક્ટર ડિ બ્રોગ્લી (Louis Victor de Broglie 1892-1987) ફ્રેન્ચ ભૌતિકવિજ્ઞાની જેમણે દ્રવ્યના તરંગ સ્વરૂપનો ક્રાન્તિકારી ખ્યાલ આપ્યો. આ ખ્યાલ ઈરવીન શ્રોડિન્જરે પૂર્ણ કક્ષાના ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્ર, જેને તરંગ યંત્રશાસ્ત્ર પણ કહે છે, તેમાં આગળ ધપાવ્યો. 1929માં તેમને ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપની શોધ માટે નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત થયું હતું.

ધારો કે સ્થિર રહેલો એક ઈલેક્ટ્રૉન (દ્રવ્યમાન m, વિદ્યુતભાર e) વીજદબાણ V વડે પ્રવેગિત થાય છે. ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિઊર્જા K, વિદ્યુતક્ષેત્ર વડે તેના પર થયેલા કાર્ય (eV) જેટલી હોય છે.

$$K = eV \tag{11.8}$$

હવે $K = \frac{1}{2} m\upsilon^2 = \frac{p^2}{2m}$. આથી

$$p = \sqrt{2mK} = \sqrt{2meV} \tag{11.9}$$

આથી ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mK}} = \frac{h}{\sqrt{2meV}} \tag{11.10}$$

છે. h, m, eના સંખ્યાત્મક મૂલ્યો મુકતાં,

$$\lambda = \frac{1.227}{\sqrt{V}} \text{ nm} \tag{11.11}$$

મળે, જ્યાં V એ વોલ્ટમાં પ્રવેગક સ્થિતિમાનનું મૂલ્ય છે. 120 V જેટલા પ્રવેગક સ્થિતિમાન માટે, સમીકરણ (11.11) પરથી $\lambda = 0.112$ nm મળે છે. આ તરંગ લંબાઈ સ્ફટિકોમાં પરમાણુઓના સ્તરો વચ્ચેના અંતરના ક્રમની છે. આ સૂચવે છે કે ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલા દ્રવ્ય તરંગોની સત્યતા ક્ષ-કિરણોના વિવર્તનની જેમ સ્ફટિક દ્વારા થતા વિવર્તનના પ્રયોગોથી ચકાસી શકાય. ડિ-બ્રોગ્લીના અધિતર્કની સત્યાર્થતા ચકાસવા માટેના પ્રયોગનું વર્ણન આપણે હવે પછીના પરિચ્છેદમાં કરીશું. 1929માં ડિ બ્રોગ્લીને ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપની શોધ કરવા બદલ ભૌતિકવિજ્ઞાનનું નૉબેલ પારિતોષિક એનાયત કરવામાં આવ્યું હતું.

તરંગ-કણ સ્વરૂપ બહુ જ અદ્‌ભૂત રીતે *હાઈઝનબર્ગના અનિશ્ચિતતાના સિદ્ધાંત*ને સમાવે છે. આ સિદ્ધાંત મુજબ, કોઈ ઈલેક્ટ્રૉન (કે બીજા કણ)નું સ્થાન અને વેગમાન *બંને એક જ સમયે (એક સાથે)* ચોક્કસાઈથી માપી શકાય નહીં. હંમેશાં, સ્થાનના વર્ણનમાં અમુક અનિશ્ચિતતા (Δx) અને વેગમાનના વર્ણનમાં અમુક અનિશ્ચિતતા (Δp) રહેલી હોય જ છે. Δx અને Δpનો ગુણાકાર $\hbar$ * ના ક્રમનો હોય છે (જ્યાં $\hbar = h/2\pi$), એટલે કે,

$$\Delta x \, \Delta p \approx \hbar \tag{11.12}$$

સમીકરણ (11.12)માં Δx શૂન્ય હોઈ શકે, પરંતુ તે પરિસ્થિતિમાં Δp અનંત (મૂલ્યનું) હોવું જોઈએ કે જેથી ગુણાકાર શૂન્ય ન થાય. તે જ રીતે જો Δp શૂન્ય હોય, તો Δx અનંત થવું જોઈએ. સામાન્ય રીતે Δx અને Δp શૂન્ય હોતા નથી, જેથી તેમનો ગુણાકાર $\hbar$ ના ક્રમનો હોય.

હવે, જો ઈલેક્ટ્રૉન ચોક્કસ વેગમાન p ધરાવતો હોય (એટલે કે $\Delta p = 0$), ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણ મુજબ, તો તેને ચોક્કસ તરંગલંબાઈ λ હોય, કોઈ ચોક્કસ (એક જ) તરંગલંબાઈ ધરાવતું તરંગ અનંત અવકાશમાં પથરાયેલું હોય છે. બોર્ન (Born's)ના સંભાવનાત્મક અર્થઘટન મુજબ આનો મતલબ એ કે

* વધુ ઊંડાણ પૂર્વકની ગણતરી $\Delta x \, \Delta p \geq \hbar/2$ આપે છે.

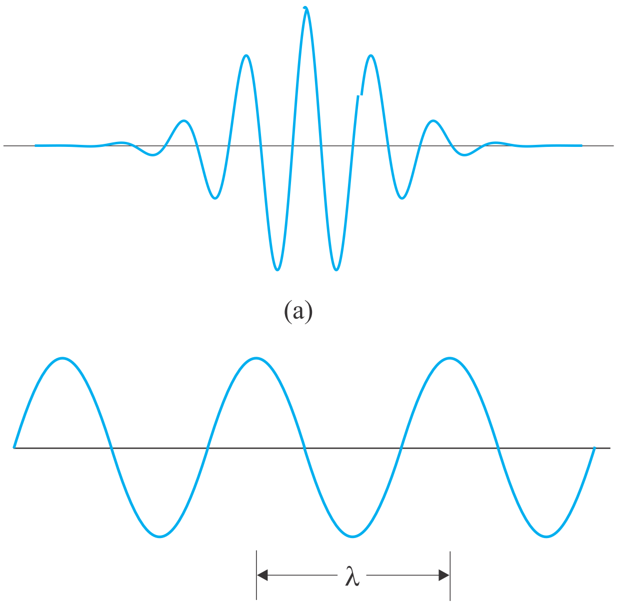
ઈલેક્ટ્રૉન અવકાશમાં કોઈ ચોક્કસ વિસ્તાર પૂરતો સિમિત નથી. એટલે કે તેના સ્થાનની અનિશ્ચિતતા અનંત ($\Delta x \to \infty$) છે, જે અનિશ્ચિતતાના સિદ્ધાંત સાથે મળતું આવે છે.

સામાન્ય રીતે, ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલ દ્રવ્ય તરંગ અનંત અવકાશમાં પથરાયેલું હોતું નથી. તે અવકાશના કોઈ પરિમિત વિસ્તારમાં પથરાયેલું એક તરંગ પડીકું (પેકેટ) હોય છે. આ પરિસ્થિતિમાં Δx અનંત નથી હોતું પરંતુ તેને કોઈ ચોક્કસ મૂલ્ય હોય છે જે તરંગ પેકેટના વિસ્તાર પર આધાર રાખે છે. આ ઉપરાંત, તમારે જાણવું જોઈએ કે પરિમિત અવકાશમાં પથરાયેલા (વિસ્તરેલા) તરંગ પેકેટને કોઈ એક ચોક્કસ તરંગલંબાઈ હોતી નથી. તે કોઈ મધ્યમાન તરંગલંબાઈની આસપાસના વિસ્તારની તરંગલંબાઈઓનું બનેલું હોય છે.

આમ, ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણ મૂજબ ઈલેક્ટ્રૉનના વેગમાનનો પણ કોઈ ગાળો (વિસ્તાર) હશે-જેની અનિશ્ચિતતા Δp હોય. અનિશ્ચિતતાના સિદ્ધાંત પરથી આ અપેક્ષિત છે. એવું દર્શાવી શકાય કે તરંગ પેકેટ વર્ણન સાથે ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણ અને બોર્નના સંભાવનાત્મક અર્થઘટન પરથી હાઈઝનબર્ગનો અનિશ્ચિતતાનો સિદ્ધાંત પુનઃસ્થાપિત થાય છે.

પ્રકરણ-12માં, આપણે જોઈશું કે ડિ બ્રોગ્લીનું સમીકરણ કેવી રીતે પરમાણુના, ઈલેક્ટ્રૉનના કોણીય વેગમાનના ક્વૉન્ટાઈઝેશન (ક્વૉન્ટમીકરણ) માટેના બ્હોરના સિદ્ધાંતને અનુમોદન આપે છે.

આકૃતિ (11.6)માં (a) પરિમિત અવકાશમાં પથરાયેલું તરંગ પેકેટ, અને (b) એક ચોક્કસ તરંગલંબાઈ ધરાવતા વિસ્તરેલ તરંગ,ની રૂપરેખા દર્શાવી છે.



આકૃતિ 11.6 (a) ઈલેક્ટ્રૉનનું તરંગ પેકેટ વર્ણન. તરંગ પેકેટ મધ્યમાન તરંગલંબાઈની આસપાસના વિસ્તારની તરંગલંબાઈઓનું બનેલું હોય છે (અને તેથી ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણ મુજબ, વેગમાનનો કોઈ ગાળો પણ ધરાવતું હોય છે.) પરિણામ સ્વરૂપે તે, સ્થાનમાં અનિશ્ચિતતા (Δx) અને વેગમાનમાં અનિશ્ચિતતા (Δp) ધરાવે છે. (b) ઈલેક્ટ્રૉનના કોઈ એક ચોક્કસ વેગમાન માટે દ્રવ્ય તરંગ અનંત (સમગ્ર) અવકાશમાં પથરાયેલું હોય છે. આ સ્થિતિમાં $\Delta p = 0$ અને $\Delta x \to \infty$.

ઉદાહરણ 11.4 (a) 5.4×10^6 m/sની ઝડપથી ગતિ કરતા ઈલેક્ટ્રૉન અને (b) 30.0 m/sની ઝડપથી ગતિ કરતા 150 g ના બૉલ, સાથે સંકળાયેલ ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલી હશે ?

ઉકેલ

(a) ઈલેક્ટ્રૉન માટે :

દ્રવ્યમાન $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg, $\upsilon = 5.4 \times 10^6$ m/s.

આથી વેગમાન $p = m\upsilon = 9.11 \times 10^{-31}$ (kg) $\times 5.4 \times 10^6$ (m/s)

$p = 4.92 \times 10^{-24}$ kg m/s

ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ $\lambda = h/p$

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J s}}{4.92 \times 10^{-24}\ \text{kg m/s}}$$

$\lambda = 0.135$ nm

(b) બૉલ માટે :

દ્રવ્યમાન $m' = 0.150$ kg, ઝડપ $\upsilon' = 30.0$ m/s

આથી વેગમાન $p' = m'\upsilon' = 0.150$ (kg) $\times$ 30.0 (m/s)

$p' = 4.50$ kg m/s

ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ $\lambda' = h/p'$

ઉદાહરણ 11.4

ઉદાહરણ 11.4

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34}\,\text{Js}}{4.50\ \text{kg m/s}}$$

$$\lambda' = 1.47 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

ઈલેક્ટ્રૉન માટેની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ ક્ષ-કિરણોની તરંગલંબાઈ સાથે સરખાવી શકાય તેવી છે. પરંતુ, બૉલ માટે તે પ્રોટોનના પરિમાણ કરતાં 10^{-19} ગણી નાની છે, જે પ્રાયોગિક રીતે માપવી શક્ય નથી.

ઉદાહરણ 11.5

ઉદાહરણ 11.5 એક ઈલેક્ટ્રૉન, એક α કણ અને એક પ્રોટોનની ગતિઊર્જાઓ સમાન છે. આમાંથી કયા કણની ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ સૌથી ટૂંકી હશે ?

ઉકેલ

કણ માટે ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ, $\lambda = h/p$

ગતિઊર્જા, $K = p^2/2m$

આથી, $\lambda = h/\sqrt{2mK}$

સમાન ગતિઊર્જા K માટે, આપેલ કણ સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ તેમના દ્રવ્યમાનના વર્ગમૂળના વ્યસ્તપ્રમાણમાં છે. ઈલેક્ટ્રૉન કરતાં પ્રોટોન $\left({}^{1}_{1}\text{H}\right)$ લગભગ 1836 ગણો ભારે હોય છે, અને α-કણ $\left({}^{4}_{4}\text{He}\right)$ પ્રોટોન કરતાં 4 ગણો ભારે હોય છે. આથી, α-કણની ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈ સૌથી ટૂંકી હશે.

દ્રવ્ય તરંગોનું સંભાવનાત્મક અર્થઘટન (PROBABILITY INTERPRETATION OF MATTER WAVES)

કણ (દા. ત. ઈલેક્ટ્રૉન) સાથે સંકળાયેલ દ્રવ્ય તરંગનો અર્થ શું છે તે જાણવા થોડુંક રોકાઈએ. ખરેખર તો દ્રવ્ય અને વિકિરણના દ્વૈત સ્વરૂપની સંતોષ જનક સમજૂતી હજી સુધી મળી નથી. ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રની શરૂઆત કરનાર મહાન વૈજ્ઞાનિકો (નિલ્સ બોહ્ર, આલ્બર્ટ આઈન્સ્ટાઈન અને બીજા ઘણા) એ આ અને તેની સાથે સંકળાયેલ ઘણા પાસાઓ સમજવા અથાગ પ્રયત્નો કર્યા. આમ છતાં ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રનું ગહન ભૌતિક અર્થઘટન હજી પણ સક્રિય સંશોધનનો વિષય છે. આમ છતાં, આધુનિક ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રમાં દ્રવ્ય તરંગનો વિચાર ગાણિતિક રીતે ખૂબ સફળતાપૂર્વક દાખલ થયો છે. આ બાબતમાં મૅક્સ બોર્ન (1882-1970) એ આપેલું દ્રવ્ય તરંગના કંપવિસ્તારનું સંભાવનાત્મક અર્થઘટન એ અગત્યનો માર્ગસ્તંભ હતો. આ મુજબ, કોઈ બિંદુએ દ્રવ્ય તરંગની તીવ્રતા (કંપવિસ્તારનો વર્ગ), તે બિંદુએ કણ હોવાની સંભાવના ઘનતા નક્કી કરે છે. સંભાવના ઘનતાનો અર્થ, એકમ કદ દીઠ સંભાવના. આમ, જો કોઈ બિંદુએ તરંગનો કંપવિસ્તાર A હોય, તો $|A|^2\Delta V$ એ આ બિંદુની આસપાસના સૂક્ષ્મ કદ ΔVમાં કણની હોવાની સંભાવના દર્શાવે છે. આમ, જો કોઈ વિસ્તારમાં દ્રવ્ય તરંગની તીવ્રતા વધુ હોય તો, ત્યાં કણને શોધવાની સંભાવના, જ્યાં ઓછી તીવ્રતા હોય ત્યાંની સરખામણીમાં, વધુ હોય છે.

ઉદાહરણ 11.6

ઉદાહરણ 11.6 એક કણ ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ કરતા 3 ગણી ઝડપે ગતિ કરે છે. કણ અને ઈલેક્ટ્રૉનની ડિ બ્રોગ્લી તરંગ લંબાઈનો ગુણોત્તર 1.813×10^{-4} છે. કણનું દ્રવ્યમાન શોધો અને તે કયો કણ હશે તે ઓળખો.

ઉકેલ

m દ્રવ્યમાન અને v વેગ ધરાવતા કણની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ

$\lambda = \dfrac{h}{p} = \dfrac{h}{m\upsilon}$

દ્રવ્યમાન $m = h/\lambda\upsilon$

ઈલેક્ટ્રૉન માટે, દ્રવ્યમાન $m_e = h/\lambda_e\upsilon_e$

પરંતુ, $\upsilon/\upsilon_e = 3$ આપેલ છે અને

$\lambda/\lambda_e = 1.813 \times 10^{-4}$

આથી, કણનું દ્રવ્યમાન $m = m_e \left(\dfrac{\lambda_e}{\lambda}\right)\left(\dfrac{\upsilon_e}{\upsilon}\right)$

$m = (9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg}) \times (1/1.813 \times 10^{-4}) \times (1/3)$

$m = 1.675 \times 10^{-27}\ \text{kg}$

આમ, આ દ્રવ્યમાન વાળો કણ પ્રોટોન કે ન્યૂટ્રૉન હોઈ શકે.

ઉદાહરણ 11.6

ઉદાહરણ 11.7 100 વોલ્ટના વિદ્યુત સ્થિતિમાનના તફાવત વડે પ્રવેગિત થયેલા ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલી હશે ?

ઉકેલ

પ્રવેગક સ્થિતિમાન V = 100 V. ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ

$\lambda = h/p = \dfrac{1.227}{\sqrt{V}}\ \text{nm}$

$\lambda = \dfrac{1.227}{\sqrt{100}}\ \text{nm} = 0.123\ \text{nm}$

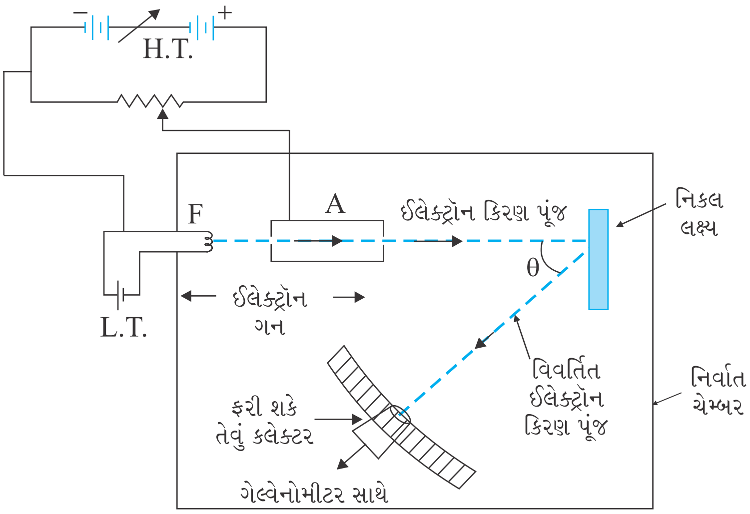
આ કિસ્સામાં ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ ક્ષ-કિરણોની તરંગલંબાઈના ક્રમની છે.

ઉદાહરણ 11.7

11.9 ડેવિસન અને ગર્મરનો પ્રયોગ (Davisson and Germer Experiment)

ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપની પ્રાયોગિક ચકાસણી પ્રથમ સી. જે. ડેવિસન અને એલ. એચ. ગર્મરે 1927માં, અને સ્વતંત્ર રીતે જી.પી. થોમસને 1928માં કરી હતી, જેમણે સ્ફટિકો વડે ઈલેક્ટ્રૉન કિરણાવલિના પ્રકીર્ણન દ્વારા વિવર્તનની ઘટનાઓનું અવલોકન કર્યું. ડેવિસન અને થોમસનને સ્ફટિકો દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉનના વિવર્તનની પ્રાયોગિક શોધ બદલ 1937માં સંયુક્ત રીતે (સરખા ભાગે) નૉબેલ પારિતોષિક મળ્યું હતું.

ડેવિસન અને ગર્મરની પ્રાયોગિક ગોઠવણીની રૂપરેખા આકૃતિ 11.7માં દર્શાવી છે. તેમાં એક ઈલેક્ટ્રૉન ગન હોય છે, જેના ટંગસ્ટનના ફિલામેન્ટ F પર બેરીયમ ઑક્સાઈડનું પડ ચઢાવેલું હોય છે અને તેને નીચા વીજદબાણના પાવર સપ્લાય (L. T. અથવા Battery) દ્વારા ગરમ કરવામાં આવે છે. ફિલામેન્ટમાંથી ઉત્સર્જાયેલા ઈલેક્ટ્રૉનને ઈચ્છિત વેગ સુધી પ્રવેગિત કરવા ઊંચા વીજ-દબાણવાળા પાવર સપ્લાય (H. T. કે



આકૃતિ 11.7 ડેવિસન-ગર્મરની ઈલેક્ટ્રૉન વિવર્તન ગોઠવણી

Battery)માંથી, યોગ્ય વીજદબાણ/વોલ્ટેજ લગાડવામાં આવે છે. તેમને સૂક્ષ્મ છિદ્રોવાળા નળાકારમાંથી તેની અક્ષની દિશામાં પસાર કરી, સાંકડી સંગઠિત કિરણાવલિ (Beam) મેળવી શકાય છે. આ બીમને નિકલના સ્ફટિકની સપાટી પર આપાત કરવામાં આવે છે. સ્ફટિકના પરમાણુઓ દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉન બધી દિશાઓમાં પ્રકેરિત થાય છે. આપેલ દિશામાં પ્રકીર્ણન પામેલા ઈલેક્ટ્રૉન બીમની તીવ્રતા, ઈલેક્ટ્રૉન ડીટેક્ટર (કલેક્ટર) વડે માપવામાં આવે છે. આ ડીટેક્ટરને વર્તુળાકાર માપપટ્ટી (સ્કેલ) પર ફેરવી શકાય છે અને તેની સાથે સંવેદનશીલ ગેલ્વેનોમીટર જોડેલું હોય છે; જે વિદ્યુતપ્રવાહ નોંધે છે. ગેલ્વેનોમીટરનું કોણાવર્તન કલેક્ટરમાં દાખલ થતા ઈલેક્ટ્રૉન બીમની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે. આ સાધનને શૂન્યાવકાશિત ચેમ્બરમાં રાખવામાં આવે છે. વર્તુળાકાર સ્કેલ પર ડીટેક્ટરને જુદા જુદા સ્થાને ફેરવીને જુદા જુદા પ્રકીર્ણન કોણ θ કે, જે આપાત અને પ્રકીર્ણન પામતા ઈલેક્ટ્રૉન બીમ વચ્ચેનો કોણ છે, તેને માટે પ્રકીર્ણન પામેલ ઈલેક્ટ્રૉન બીમની તીવ્રતા માપવામાં આવે છે. જુદા જુદા પ્રકીર્ણન કોણ θ માટે પ્રકીર્ણન પામેલા ઈલેક્ટ્રૉનની તીવ્રતા (I)નો ફેરફાર જુદા જુદા પ્રવેગક વોલ્ટેજ (વીજદબાણ) માટે માપવામાં આવે છે.

આ પ્રવેગક વોલ્ટેજને 44 V થી 68 V સુધી બદલીને પ્રયોગ કરવામાં આવ્યો હતો. એવું નોંધવામાં આવ્યું હતું કે, 54 V જેટલા પ્રવેગક વીજદબાણ અને પ્રકીર્ણન કોણ $\theta = 50^{\circ}$ માટે, પ્રકીર્ણન પામેલ ઈલેક્ટ્રૉન બીમની તીવ્રતા (I)માં મહત્તમ ઊછાળો (વધારો) જોવા મળ્યો હતો.

સ્ફટિકના જુદા જુદા સ્તરો પરથી પ્રકીર્ણન પામેલા ઈલેક્ટ્રૉનના સહાયક વ્યતિકરણના કારણે ચોક્કસ દિશામાં મહત્તમ (ઊંચુ) મૂલ્ય મળે છે. ઈલેક્ટ્રૉનના વિવર્તન અંગેના માપન પરથી, દ્રવ્ય તરંગોની તરંગલંબાઈ 0.165 nm જેટલી મળી હતી.

$$\lambda = h/p = \frac{1.227}{\sqrt{V}}\ \text{nm}$$

$$\lambda = \frac{1.227}{\sqrt{54}}\ \text{nm} = 0.167\ \text{nm}$$

આમ, ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈના પ્રાયોગિક મૂલ્ય અને સૈદ્ધાંતિક રીતે મેળવેલ મૂલ્ય વચ્ચે ખૂબ જ સંમતિ જોવા મળે છે. આ રીતે ડેવિસન-ગર્મરનો પ્રયોગ ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપ અને ડિ બ્રોગ્લી સમીકરણને સ્પષ્ટ રીતે અનુમોદન આપે છે. તાજેતરમાં, 1989માં, ઈલેક્ટ્રૉન બીમના તરંગ સ્વરૂપનું પ્રાયોગિક નિદર્શન, પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપ માટે વપરાય છે તેવા બે સ્લિટના પ્રયોગ દ્વારા, કરવામાં આવ્યું હતું. આ ઉપરાંત, 1994માં એક પ્રયોગ દરમિયાન, ઈલેક્ટ્રૉન કરતાં લાખો ગણા ભારે એવા આયોડિનના અણુઓના બીમ દ્વારા વ્યતિકરણની શલાકાઓ મેળવવામાં આવી હતી.

આધુનિક ક્વૉન્ટમ યંત્રશાસ્ત્રના વિકાસમાં ડિ બ્રોગ્લીનો સિદ્ધાંત પાયારૂપ છે. તે ઈલેક્ટ્રૉન ઓપ્ટીક્સ (Optics) ના ક્ષેત્ર તરફ પણ દોરી ગયેલ છે. ઈલેક્ટ્રૉન માઈક્રોસ્કોપની રચનામાં ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપનો ઉપયોગ કરવામાં આવ્યો છે. જે દૃશ્ય (પ્રકાશ) માઈક્રોસ્કોપ કરતાં વધુ વિભેદન શક્તિ ધરાવે છે.

Development of electron microscope
http://www.nobelprize.org

PHYSICS

સારાંશ

1. ધાતુની સપાટીમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનને બહાર નીકળવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જાને તે ધાતુનું કાર્ય વિધેય કહે છે. ઈલેક્ટ્રૉનને ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર કાઢવા માટે જરૂરી ઊર્જા (કાર્ય વિધેય ϕ_0 કરતાં વધુ), યોગ્ય રીતે ગરમ કરીને કે પ્રબળ વિદ્યુતક્ષેત્ર લાગુ પાડીને અથવા યોગ્ય આવૃત્તિનો પ્રકાશ આપાત કરીને આપી શકાય.
2. જ્યારે ધાતુ પર યોગ્ય આવૃત્તિનો પ્રકાશ આપાત કરવામાં આવે ત્યારે તેમાંથી ઈલેક્ટ્રૉનના ઉત્સર્જનની ઘટનાને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર કહે છે. કેટલીક ધાતુઓ અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ માટે, જ્યારે કેટલીક દ્રશ્ય પ્રકાશ માટે પણ સંવેદી (સંવેદનશીલ) હોય છે. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરમાં પ્રકાશ ઊર્જાનું વિદ્યુતઊર્જામાં રૂપાંતર થાય છે. તે ઊર્જા સંરક્ષણના નિયમનું પાલન કરે છે. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર તાત્ક્ષણિક અસર છે અને તે કેટલીક વિશિષ્ટતાઓ ધરાવે છે.
3. ફોટો ઈલેક્ટ્રીક પ્રવાહ, (i) આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા, (ii) બે ઈલેક્ટ્રૉન વચ્ચે લગાડેલ સ્થિતિમાનના તફાવત, અને (iii) ઉત્સર્જન પદાર્થના પ્રકાર (પ્રકૃતિ), પર આધાર રાખે છે.
4. સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ (V_0), (i) આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ, અને (ii) ઉત્સર્જક દ્રવ્યના પ્રકાર, પર આધાર રાખે છે. આપાત પ્રકાશની આપેલ આવૃત્તિ માટે, તે તીવ્રતા પર આધાર રાખતું નથી. સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ ઉત્સર્જાયેલા (ફોટો) ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા સાથે પ્રત્યક્ષ સંકળાયેલું હોય છે : $eV_0 = (1/2)\, m\, \upsilon^2_{max} = K_{max}$.
5. દ્રવ્ય માટે લાક્ષણિક એવી, એક ચોક્કસ આવૃત્તિ (થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ) ν_0 થી ઓછી આવૃત્તિ માટે, તીવ્રતા ગમે તેટલી વધુ હોય તો પણ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન થતું નથી.
6. પ્રચલિત તરંગવાદ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરની લાક્ષણિકતાઓ સમજાવી શકતો નથી. વિકિરણમાંથી ઊર્જાનું સતત શોષણ દર્શાવતો તેનો સિદ્ધાંત, K_{max}નું તીવ્રતા પર આધારિત ન હોવું, ν_0 (થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ)નું અસ્તિત્વ અને (ફોટોઈલેક્ટ્રીક) ઘટનાનું તાત્ક્ષણિકપણું સમજાવી શકતો નથી. આઈન્સ્ટાઈને આ લાક્ષણિકતાઓને પ્રકાશની ફોટોન પ્રકૃતિના આધારે સમજાવી હતી. આ મુજબ, પ્રકાશ, ઊર્જાના અમુક જથ્થાઓ (પેકેટ)નો બનેલો છે, જેમને ક્વૉન્ટમ કે ફોટોન કહે છે. દરેક ફોટોનને ઊર્જા $E (= h\nu)$ અને વેગમાન $p\ (= h\ \lambda)$ હોય છે જે આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિ (ν) પર આધાર રાખે છે, પણ તીવ્રતા પર નહીં. ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા ફોટોનના શોષણના કારણે ધાતુની સપાટીમાંથી ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન થાય છે.
7. આઈન્સ્ટાઈનનું ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ, ઊર્જા સંરક્ષણના નિયમને સુસંગત છે જે ધાતુમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા ફોટોનના શોષણ પર લાગુ પડે છે. ફોટોનની ઊર્જા ($h\nu$)માંથી લક્ષ્ય ધાતુનું કાર્ય વિધેય $\phi_0 (= h\ \nu_0)$ બાદ કરતાં (ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની) મહત્તમ ગતિઊર્જા $(1/2)m\upsilon^2_{max}$ મળે છે.

   $$\frac{1}{2} m\,\upsilon^2_{max} = V_0 e = h\nu - \phi_0 = h(\nu - \nu_0)$$

   આ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક સમીકરણ, ફોટોઈલેક્ટ્રીક અસરની બધી જ લાક્ષણિકતાઓ સમજાવે છે. મિલિકનના પ્રથમ ચોક્કસ માપનોએ આઈન્સ્ટાઈનના ફોટોઈલેક્ટ્રીક સમીકરણની સત્યતાને સમર્થન પુરું પાડ્યું અને પ્લાન્કના અચળાંક hનું ચોક્કસ મૂલ્ય મેળવ્યું, જે આઈન્સ્ટાઈને રજૂ કરેલા વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણના કણ કે ફોટોન વર્ણનની સ્વીકૃતિ તરફ દોરી ગયું.
8. વિકિરણ દ્વૈત પ્રકૃતિ ધરાવે છે : તરંગ અને કણ. કોઈ પ્રયોગના પરિણામને સમજવા પ્રકાશનું તરંગ કે કણ, કયું સ્વરૂપ ધ્યાનમાં લેવું શ્રેષ્ઠ છે તે પ્રયોગના પ્રકાર પરથી નક્કી થાય છે. પ્રકૃતિમાં વિકિરણ અને દ્રવ્ય સંમિતિ ધરાવે છે. એવા તર્ક પરથી લ્યુઈસ વિક્ટર ડિ બ્રોગ્લીએ દ્રવ્ય (દ્રવ્ય કણો)ને તરંગ-પ્રકૃતિ સાથે સાંકળ્યા. ગતિ કરતા દ્રવ્ય કણો સાથે સંકળાયેલા તરંગોને દ્રવ્ય તરંગો કે ડિ બ્રોગ્લી તરંગો કહે છે.

9. ગતિમાન કણ સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ (λ) તેના વેગમાન p સાથે આ મુજબ સંબંધિત છે : $\lambda = h/p$. દ્રવ્યનું દ્વૈતપણું ડિ બ્રોગ્લી સમીકરણમાં રહેલું છે. જે તરંગવિભાવના (λ) અને કણ વિભાવના (p) ને સમાવે છે. ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ દ્રવ્ય કણના વિદ્યુતભાર અને તેની પ્રકૃતિ પર આધાર રાખતી નથી. તે ફક્ત પરમાણુથી નાના કણો જેમકે ઈલેક્ટ્રૉન, પ્રોટોન વગેરે માટે જ (તેમના સૂક્ષ્મ દળ અને તેથી સૂક્ષ્મ વેગમાનના કારણે) ચોક્કસ રીતે માપી શકાય તેવા અંતરના (સ્ફટિકોમાંના પરમાણ્વિક સ્તરો વચ્ચેના અંતરના) ક્રમના હોય છે. આમ છતાં તે રોજિંદા જીવનમાં જોવામાં આવતા, સ્થૂળ પદાર્થો માટે માપી ન શકાય તેટલી નાની હોય છે.

10. ડેવિસન અને ગર્મર, અને જી. પી. થોમસન, તથા ત્યારબાદના બીજા ઘણા ઈલેક્ટ્રૉન વિવર્તનના પ્રયોગો દ્વારા ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ સ્વરૂપની ચકાસણી તથા સત્યતા સાબિત થઈ છે. દ્રવ્ય તરંગો માટેનો ડિ બ્રોગ્લીનો સિદ્ધાંત, બ્હોરના સ્થિર કક્ષાઓના ખ્યાલને સમર્થન આપે છે.

ભૌતિક રાશિ	સંજ્ઞા	પરિમાણ	એકમ	વિશેષ નોંધ
પ્લાન્કનો અચળાંક	h	$[ML^2T^{-1}]$	J s	$E = h\nu$
સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ	V_0	$[ML^2T^{-3}A^{-1}]$	V	$eV_0 = K_{max}$
કાર્ય વિધેય	ϕ_0	$[ML^2T^{-2}]$	J; eV	$K_{max} = E - \phi_0$
થ્રેશોલ્ડ (સીમાંત) આવૃત્તિ	ν_0	$[T^{-1}]$	Hz	$\nu_0 = \phi_0/h$
ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ	λ	[L]	m	$\lambda = h/p$

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ

1. ધાતુમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રૉન ધાતુની અંદર અચળ વિદ્યુત સ્થિતિમાનમાં ગતિ કરી શકે છે તે અર્થમાં મુક્ત છે (આ એક સંનિકટતા છે). તેઓ ધાતુની સપાટીમાંથી બહાર નીકળવા માટે મુક્ત નથી. તેમને ધાતુમાંથી બહાર કાઢવા માટે વધારાની ઊર્જાની જરૂર પડે છે.
2. ધાતુમાં રહેલા બધા જ મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા સમાન હોતી નથી. વાયુ પાત્રમાં રહેલા વાયુના અણુઓની જેમ, આપેલ તાપમાને આ ઈલેક્ટ્રૉનને પણ એક ચોક્કસ ઊર્જા વિતરણ (Distribution) હોય છે. આ વિતરણ એ તમે વાયુના ગતિવાદમાં ભણ્યા એ મેક્સવેલના વિતરણથી અલગ છે. તમે આગળના અભ્યાસક્રમમાં તેના વિશે ભણશો, પરંતુ આ તફાવત, ઈલેક્ટ્રૉન પાઉલીના અપવર્જન (Exclusion) ના સિદ્ધાંતનું પાલન કરે છે તે હકીકત સાથે સંબંધિત છે.
3. ધાતુમાં ઈલેક્ટ્રૉનના ઊર્જા વિતરણના કારણે, જુદા જુદા ઈલેક્ટ્રૉન માટે ઈલેક્ટ્રૉનને ધાતુમાંથી બહાર નીકળવા માટે જરૂરી ઊર્જા જુદા જુદા ઈલેક્ટ્રોન માટે જુદી જુદી હોય છે. વધુ ઊર્જા ધરાવતા ઈલેક્ટ્રોનને ઓછી ઊર્જા ધરાવતા ઈલેક્ટ્રોન કરતાં બહાર નીકળવા માટે ઓછી ઊર્જાની જરૂર પડે છે. કાર્યવિધેય એ ધાતુમાંથી ઈલેક્ટ્રોનને બહાર નીકળવા માટે જરૂરી લઘુત્તમ ઊર્જા છે.

4. ફોટોઈલેક્ટ્રીક અસરના અવલોકનો દર્શાવે છે કે, દ્રવ્ય અને પ્રકાશની આંતરક્રિયા દરમિયાન, *ઊર્જાનું શોષણ વિભક્ત (છુટાછુટા) જથ્થાઓ $h\nu$ ના એકમોમાં થાય છે.* આનો અર્થ એ નથી કે પ્રકાશ $h\nu$ ઊર્જાવાળા કણોનો બનેલો છે.
5. સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ (જે તીવ્રતા પર આધાર રાખતું નથી પરંતુ આવૃત્તિ પર આધાર રાખે છે) ના અવલોકનો ફોટોઈલેક્ટ્રીક અસરના તરંગ-સ્વરૂપ અને ફોટોન સ્વરૂપ વચ્ચેનો નિર્ણાયક ભેદ દર્શાવે છે.
6. $\lambda = h/p$ વડે અપાતી દ્રવ્ય તરંગની તરંગ લંબાઈનું ભૌતિક મહત્વ છે, પરંતુ તેના કળા વેગ υ_p (Phase Velocity)નું કોઈ ભૌતિક મહત્વ નથી. આમ છતાં, દ્રવ્ય તરંગનો સમૂહ વેગ (Group Velocity) કે જે કણના વેગ જેટલો હોય છે તે ભૌતિક રીતે અર્થપૂર્ણ છે.

સ્વાધ્યાય

11.1 30 kVના ઈલેક્ટ્રૉન દ્વારા ઉત્પન્ન થતા ક્ષ-કિરણોની
(a) મહત્તમ આવૃત્તિ, અને
(b) લઘુત્તમ તરંગલંબાઈ શોધો.

11.2 સિઝિયમ ધાતુનું કાર્ય વિધેય 2.14 eV છે. જ્યારે 6×10^{14} Hzનો પ્રકાશ આ ધાતુની સપાટી પર આપાત થાય, ત્યારે ઈલેક્ટ્રૉનનું ફોટો ઉત્સર્જન થાય છે.
(a) ઉત્સર્જિત ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા,
(b) સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ, અને
(c) ઉત્સર્જિત ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ઝડપ, કેટલી હશે ?

11.3 એક પ્રયોગમાં ફોટોઈલેક્ટ્રીક કટ-ઓફ વોલ્ટેજ 1.5 V છે. ઉત્સર્જાયેલા ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનની મહત્તમ ગતિઊર્જા કેટલી હશે ?

11.4 હિલિયમ-નિયોન લેસર વડે 632.8 nm તરંગલંબાઈનો એકરંગી (Monochromatic) પ્રકાશ ઉત્પન્ન થાય છે. ઉત્સર્જિત પાવર 9.42 mW જેટલો છે.
(a) પ્રકાશ પૂંજમાં રહેલા દરેક ફોટોનની ઊર્જા અને વેગમાન શોધો.
(b) આ પૂંજ વડે પ્રકાશિત લક્ષ્ય (ટાર્ગેટ) પર સરેરાશ રીતે એક સેકન્ડ દીઠ કેટલા ફોટોન આપાત થતા હશે ? (પૂંજનો આડછેદ સમાન અને લક્ષ્યના ક્ષેત્રફળ કરતાં નાનો છે તેમ ધારો), અને
(c) ફોટોનના વેગમાન જેટલું વેગમાન ધરાવવા માટે હાઈડ્રોજન પરમાણુએ કેટલી ઝડપથી ગતિ કરવી જોઈએ ?

11.5 પૃથ્વીની સપાટી પર આવતા સૂર્યપ્રકાશની ઊર્જાનું ફ્લક્સ 1.388×10^3 W/m^2 છે. પૃથ્વીની સપાટી પર એક ચોરસ મીટરમાં દર સેકન્ડ દીઠ (લગભગ) કેટલા ફોટોન્સ આપાત થતા હશે ? સૂર્યપ્રકાશના ફોટોનની સરેરાશ તરંગ લંબાઈ 550 nm છે એમ ધારો.

11.6 ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરના એક પ્રયોગમાં, કટ ઓફ વૉલ્ટેજ વિરુદ્ધ આપાત પ્રકાશની આવૃત્તિનો ઢાળ 4.12×10^{-15} V s જેટલો મળે છે. પ્લાન્કના અચળાંકનું મૂલ્ય શોધો.

11.7 100 Wનો એક સોડિયમ લૅમ્પ બધી દિશાઓમાં સમાન રીતે ઊર્જાનું ઉત્સર્જન કરે છે. આ લૅમ્પને એક મોટા ગોળાના કેન્દ્ર પર રાખેલો છે. ગોળો તેના પર આપાત થયેલ બધા જ સોડિયમ પ્રકાશનું શોષણ કરે છે. સોડિયમ પ્રકાશની તરંગ લંબાઈ 589 nm છે.
(a) સોડિયમ પ્રકાશ માટે એક ફોટોન દીઠ કેટલી ઊર્જા સંકળાયેલી હશે ?
(b) ગોળા પર કેટલા દરથી ફોટોન આપાત થતા હશે ?

11.8 એક ચોક્કસ ધાતુ માટે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ 3.3×10^{14} Hz છે. જો આ ધાતુ પર 8.2×10^{14} Hz આવૃત્તિનો પ્રકાશ આપાત થતો હોય તો ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન માટે કટ ઓફ વોલ્ટેજનું મૂલ્ય શોધો.

11.9 એક ધાતુનું કાર્ય વિધેય 4.2 eV છે. શું આ ધાતુ 330 nm તરંગલંબાઈના આપાત વિકિરણ માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન કરશે ?

11.10 એક ધાતુની સપાટી પર 7.21×10^{14} Hz તરંગલંબાઈનો પ્રકાશ આપાત થાય છે. તેની સપાટીમાંથી 6.0×10^{5} m/sની મહત્તમ ઝડપ ધરાવતા ઈલેક્ટ્રૉન ઉત્સર્જિત થાય છે. ઈલેક્ટ્રૉનના ફોટો ઉત્સર્જન માટે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ કેટલી હશે ?

11.11 આર્ગન લેસર વડે ઉત્પન્ન થયેલ 488 nmના પ્રકાશનો ઉપયોગ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરમાં થયો છે. જ્યારે આ વર્ણપટ રેખાનો પ્રકાશ ઉત્સર્જક પર આપાત થાય ત્યારે ફોટો ઈલેક્ટ્રૉનનું સ્ટોપિંગ (કટ ઑફ) પોટેન્શિયલ 0.38 V છે. ઉત્સર્જક જે દ્રવ્યમાંથી બનેલ છે તેનું કાર્ય વિધેય શોધો.

11.12 56 V વિદ્યુત સ્થિતિમાનના તફાવત વડે પ્રવેગિત ઈલેક્ટ્રૉન માટે

(a) વેગમાન, અને

(b) ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો.

11.13 120 eV જેટલી ગતિઊર્જા ધરાવતા ઈલેક્ટ્રૉનનું

(a) વેગમાન,

(b) ઝડપ અને

(c) ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલા હશે ?

11.14 સોડિયમના ઉત્સર્જન વર્ણપટ રેખાના પ્રકાશની તરંગલંબાઈ 589 nm છે.

(a) ઈલેક્ટ્રૉન અને

(b) ન્યૂટ્રૉનની કઈ ગતિઊર્જા માટે આટલી તરંગલંબાઈ મળશે ?

11.15 આપેલ કિસ્સાઓ માટે ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો.

(a) 1.0 km/sની ઝડપથી ગતિ કરતી 0.040 kg દળની બુલેટ,

(b) 1.0 m/sની ઝડપથી ગતિ કરતો 0.060 kg દળ ધરાવતો બૉલ,

(c) 2.2 m/sની ઝડપથી ગતિ કરતો 1.0×10^{-9} kg દળ ધરાવતો ધુળનો રજકણ.

11.16 એક ઈલેક્ટ્રૉન અને ફોટોન બંનેની તરંગલંબાઈ 1.00 nm છે. તેમના માટે

(a) તેમના વેગમાન,

(b) ફોટોનની ઊર્જા અને

(c) ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિઊર્જા શોધો.

11.17 (a) ન્યૂટ્રૉનની કેટલી ગતિઊર્જા માટે તેની સાથે સંકળાયેલ ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ 1.40×10^{-10} m હશે ?

(b) આ ઉપરાંત 300 K તાપમાને દ્રવ્ય સાથે તાપીય સંતુલનમાં રહેલા (3/2) kT જેટલી સરેરાશ ગતિઊર્જા ધરાવતા ન્યૂટ્રૉન માટે ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો.

11.18 દર્શાવો કે વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણની તરંગલંબાઈ તેના ક્વૉન્ટમ (ફોટોન)ની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ જેટલી હોય છે.

11.19 હવામાં 300 K તાપમાને રહેલા નાઈટ્રોજન અણુની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ કેટલી હશે ? અણુ આ તાપમાને અણુઓની સરેરાશ વર્ગિત ઝડપના વર્ગમૂળ જેટલી ઝડપથી ગતિ કરે છે તેમ ધારો (નાઈટ્રોજનનું પરમાણુદળ $= 14.0076\,u$).

વધારાના સ્વાધ્યાય

11.20 (a) શૂન્યાવકાશિત નળીમાં તપાવેલા ઉત્સર્જક પરથી ઉત્સર્જાયેલા અને ઉત્સર્જકની સાપેક્ષે 500 V સ્થિતિમાનના તફાવતે રહેલા કલેક્ટર પર આપાત થતા ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ શોધો. ઈલેક્ટ્રૉનની પ્રારંભિક અલ્પ ઝડપ અવગણો. ઈલેક્ટ્રૉનનો *વિશિષ્ટ વિદ્યુતભાર* એટલે કે તેના e/mનું મૂલ્ય 1.76×10^{11} C kg^{-1} આપેલ છે.

(b) (a)માં તમે ઉપયોગ કરેલા સમીકરણ પરથી 10 MV જેટલા કલેક્ટર સ્થિતિમાન માટે ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ શોધો. તમને શું ખોટું જણાય છે ? આ સૂત્રમાં કયો સુધારો કરવો જોઈએ ?

11.21 (a) એક સરખી ઊર્જા ધરાવતા 5.20×10^{6} m s^{-1} જેટલી ઈલેક્ટ્રૉનની ઝડપ ધરાવતા ઈલેક્ટ્રૉન બીમ (કિરણાવલી) પર વેગને લંબરૂપે 1.30×10^{-4} T જેટલું ચુંબકીયક્ષેત્ર લગાડેલ છે. આ બીમ વડે આંતરેલા વર્તુળાકાર માર્ગની ત્રિજ્યા કેટલી હશે ? ઈલેક્ટ્રૉન માટે e/mનું મૂલ્ય 1.76×10^{11} C kg^{-1} આપેલ છે.

(b) શું (a)માં તમે ઉપયોગમાં લીધેલ સૂત્ર, 20 MeV ઈલેક્ટ્રૉન બીમના માર્ગની ત્રિજ્યાની ગણતરીમાં ઉપયોગ કરી શકો ? જો ના તો, તેમાં શું સુધારો કરવો જોઈએ ?

[*નોંધ* : સ્વાધ્યાય 11.20(b) અને 11.21(b) તમને સાપેક્ષવાદીય યંત્રશાસ્ત્ર તરફ દોરી જાય છે. જે આ પુસ્તકની મર્યાદા બહાર છે. અહીંયા તેમનો ઉપયોગ કરવાનો આશય એ બાબત તરફ ધ્યાન દોરવાનો છે કે સ્વાધ્યાયના ભાગ (a)માં તમે જે સમીકરણોનો ઉપયોગ કરો છો તે ખૂબ ઊંચી ઝડપ અને ઊર્જાઓ માટે લાગુ પડતા નથી. ખૂબ ઊંચી ઝડપ અને ઊર્જા એટલે શું તે સમજવા માટે અંતમાં આપેલા ઉકેલ જુઓ.]

11.22 100 V જેટલો કલેક્ટર વોલ્ટેજ ધરાવતી એક ઈલેક્ટ્રૉન ગન, નીચા દબાણે [$\sim 10^{-2}$ mm Hg] રહેલા હાઈડ્રોજન વાયુ ભરેલા ગોળાકાર બલ્બમાં ઈલેક્ટ્રૉન છોડે છે. 2.83×10^{-4} T જેટલું ચુંબકીયક્ષેત્ર ઈલેક્ટ્રૉનના માર્ગને 12.0 cm ત્રિજ્યાની વર્તુળાકાર કક્ષામાં વાળે છે. (આ માર્ગ એટલા માટે જોઈ શકાય છે કે માર્ગમાં આવતા વાયુના આયનો ઈલેક્ટ્રૉનને આકર્ષીને બીમને કેન્દ્રિત કરે છે, તથા ઈલેક્ટ્રૉન પ્રાપ્ત (Capture) કરીને પ્રકાશનું ઉત્સર્જન કરે છે, આ રીતને 'ફાઈન બીમ ટ્યૂબ' પદ્ધતિ કહે છે) આપેલ માહિતી પરથી e/m શોધો.

11.23 (a) એક ક્ષ-કિરણની ટ્યૂબ સતત વર્ણપટના વિકિરણો ઉત્સર્જિત કરે છે જેમની સૌથી ટૂંકી તરંગલંબાઈ 0.45Å છે. આ વિકિરણમાં ફોટોનની મહત્તમ ઊર્જા કેટલી હશે ?

(b) તમારા (a)ના જવાબ માટે (ઈલેક્ટ્રૉન) ટ્યૂબમાં પ્રવેગક વોલ્ટેજ કેટલા ક્રમનો હોવો જોઈએ ?

11.24 ઈલેક્ટ્રૉનની પોઝિટ્રૉન સાથેની ઉચ્ચ ઊર્જા અથડામણો માટેના એક્સિલેટર (પ્રવેગક) પ્રયોગમાં કોઈ ઘટનાનું અર્થઘટન 10.2 BeVની કુલ ઊર્જાના ઈલેક્ટ્રૉન-પોઝિટ્રૉન જોડકાંના પૂર્ણ નાશ દ્વારા સમાન ઊર્જાના બે γ-કિરણોના ઉત્સર્જન તરીકે થાય છે. દરેક γ-કિરણ સાથે સંકળાયેલી તરંગ લંબાઈ કેટલી હશે ? (1 BeV = 10^{9} eV)

11.25 નીચેની બે સંખ્યાઓનો અંદાજ મેળવવો રસપ્રદ રહેશે. પહેલી સંખ્યા તમને એ કહેશે કે શા માટે રેડિયો એન્જિનિયરોએ ફોટોન વિશે બહુ ચિંતા કરવી જરૂરી નથી ! બીજી સંખ્યા એ કહેશે કે ભલેને માંડ પારખી શકાય તેવો પ્રકાશ હોય તો પણ શા માટે આપણી આંખ ક્યારેય ફોટોનની ગણતરી કરી શકતી નથી.

(a) 500 m તરંગલંબાઈના રેડિયો તરંગો ઉત્સર્જિત કરતા 10 kW પાવરના મિડિયમ વેવ ટ્રાન્સમીટરમાંથી એક સેકન્ડ દીઠ ઉત્સર્જાતા ફોટોનની સંખ્યા,

(b) સફેદ પ્રકાશની ન્યૂનતમ તીવ્રતા જેનો મનુષ્યો અહેસાસ કરી શકે ($\sim 10^{-10}$ W m^{-2}) તેને અનુરૂપ આપણી આંખની કીકીમાં દર સેકંડે દાખલ થતા ફોટોનની સંખ્યા, આંખની કીકીનું ક્ષેત્રફળ આશરે 0.4 cm^{2} લો અને સફેદ પ્રકાશની સરેરાશ આવૃત્તિ આશરે 6×10^{14} Hz લો.

11.26 100 Wના મર્ક્યુરી બલ્બમાંથી નીકળતો 2271 Å તરંગલંબાઈનો અલ્ટ્રાવાયોલેટ પ્રકાશ મોલિબ્ડેનમ ધાતુમાંથી બનેલા ફોટોસેલને પ્રકાશિત કરે છે. જો સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ –1.3 V હોય, તો ધાતુનું કાર્યવિધેય શોધો. આ ફોટોસેલ He-Ne લેસરમાંથી ઉત્સર્જાયેલ 6328 Å ના ઊંચી તીવ્રતા ($\sim 10^5$ W m^{-2}) ધરાવતા લાલ પ્રકાશ પ્રત્યે કેવો પ્રતિભાવ આપશે ?

11.27 સિઝિયમનું પ્રકાશ-સંવેદી દ્રવ્ય લગાડેલા ટંગસ્ટન, નિયોન બલ્બમાંથી આવતા 640.2 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9}$ m) તરંગલંબાઈના એકરંગી પ્રકાશ વડે પ્રકાશિત થાય છે. સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ 0.54 V માપેલ છે. પ્રકાશના આ ઉદ્‌ગમની જગ્યાએ આયર્ન ઉદ્‌ગમ મુકવામાં આવે છે જેની 427.2 nm (તરંગલંબાઈની) વર્ણપટ રેખા આ ફોટોસેલને પ્રકાશિત કરે છે. નવું સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ શોધો.

11.28 ફોટા ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જનના આવૃત્તિ પરના અવલંબન (આધાર, Dependence) ના અભ્યાસ માટે મર્ક્યુરી લૅમ્પ યોગ્ય ઉદ્‌ગમ છે, કારણ કે તે UVથી લઈને દૃશ્ય પ્રકાશના વર્ણપટના લાલ છેડા સુધીની ઘણી બધી વર્ણપટરેખાઓ આપે છે. રૂબિડિયમ ફોટોસેલ સાથેના આપણા પ્રયોગ દરમિયાન, મર્ક્યુરી ઉદ્‌ગમની નીચે આપેલ વર્ણપટરેખાઓનો ઉપયોગ થયો હતો :

$\lambda_1 = 3650$ Å, $\lambda_2 = 4047$ Å, $\lambda_3 = 4358$ Å, $\lambda_4 = 5461$ Å, $\lambda_5 = 6907$ Å

તેમને અનુલક્ષીને માપેલા સ્ટોપિંગ પોટેન્શિયલ અનુક્રમે આ મુજબ છે :

$V_{01} = 1.28$ V, $V_{02} = 0.95$ V, $V_{03} = 0.74$ V, $V_{04} = 0.16$ V, $V_{05} = 0$ V

પ્લાન્કના અચળાંક h નું મૂલ્ય, આપેલ દ્રવ્ય માટે થ્રેશોલ્ડ આવૃત્તિ અને કાર્યવિધેય શોધો.

(*નોંધ :* તમે જોશો કે આપેલ માહિતી પરથી hની ગણતરી કરવા માટે eની જરૂર પડશે (જે તમે 1.6×10^{-19} C લઈ શકો). *Na*, *Li*, K વગેરે પર મિલિકને આવા પ્રયોગો કર્યા હતા જેમાં તેમણે (ઓઈલ ડ્રોપ પ્રયોગ-Oil Drop Experiment પરથી) મેળવેલ eના મૂલ્યનો ઉપયોગ કરીને આઈન્સ્ટાઈનના ફોટોઈલેક્ટ્રીક સમીકરણની સત્યતા ચકાસી હતી અને તે સાથે જ hના મૂલ્યનો સ્વતંત્ર અંદાજ આપ્યો હતો.)

11.29 નીચેની ધાતુઓનું કાર્યવિધેય આ મુજબ આપેલ છે :

Na : 2.75 *e*V, K : 2.30 *e*V, *Mo* : 4.17 *e*V, *Ni* : 5.15 *e*V.

આમાંથી કઈ ધાતુ ફોટોસેલથી 1 m અંતરે મૂકેલા He-*Cd* લેસરમાંથી આવતા 3300 Å તરંગલંબાઈના વિકિરણ માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન નહીં આપે ? જો લેસરને પાસે લાવીને 50 cm અંતરે મુકવામાં આવે તો શું થશે ?

11.30 10^{-5} W m^{-2} તીવ્રતાનો પ્રકાશ, 2 cm^2 જેટલું સપાટીનું ક્ષેત્રફળ ધરાવતા સોડિયમ ફોટોસેલ પર પડે છે. સોડિયમના ઉપરના 5 સ્તરો આપાત પ્રકાશનું શોષણ કરે છે તેમ ધારીને વિકિરણની તરંગ પ્રકૃતિ મુજબ ફોટો ઈલેક્ટ્રીક ઉત્સર્જન માટે કેટલો સમય લાગશે તે નક્કી કરો. ધાતુનું કાર્યવિધેય લગભગ 2 *e*V જેટલું આપેલું છે. તમારો જવાબ શું સૂચવે છે ?

11.31 સ્ફટિક દ્વારા વિવર્તનના પ્રયોગો, ક્ષ-કિરણો કે યોગ્ય વોલ્ટેજ દ્વારા પ્રવેગિત કરેલા ઈલેક્ટ્રોન વડે કરી શકાય છે. કયા શોધક (Probe) (કિરણ)ની ઊર્જા વધુ હશે ? (માત્રાત્મક સરખામણી માટે, શોધક/કિરણની તરંગલંબાઈ 1 Å લો, જે લેટિસના આંતર પરમાણ્વિક અંતરોના ક્રમની છે.) ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg)

11.32 (a) 150 *e*V ગતિઊર્જા ધરાવતા ન્યુટ્રોનની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો. સ્વાધ્યાય 11.31માં તમે જોયું તે મુજબ આ ઊર્જા ધરાવતું ઈલેક્ટ્રોન બીમ સ્ફટિક દ્વારા વિવર્તનના પ્રયોગો માટે યોગ્ય છે. શું આટલી જ ઊર્જા ધરાવતું ન્યુટ્રોનનું બીમ એટલું જ યોગ્ય છે ? સમજાવો. ($m_n = 1.675 \times 10^{-27}$ kg)

(b) ઓરડાના તાપમાને ($27\ ^{o}C$) રહેલા થર્મલ ન્યુટ્રૉન સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો. તે પરથી સમજાવો કે શા માટે ન્યુટ્રૉન વિવર્તનના પ્રયોગો કરતાં પહેલાં ઝડપી ન્યુટ્રૉન બીમને પર્યાવરણ જેવી જ ઉષ્મીય સ્થિતિમાં લાવવું (Thermalise કરવું) જરૂરી છે.

11.33 એક ઈલેક્ટ્રૉન માઈક્રોસ્કોપ 50 kV વોલ્ટેજ વડે પ્રવેગિત થયેલ ઈલેક્ટ્રૉનનો ઉપયોગ કરે છે. આ ઈલેક્ટ્રૉન સાથે સંકળાયેલ ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો. જો બીજાં પરિબળો (જેવા કે, ન્યુમેરીકલ એપર્ચર, વગેરે) લગભગ એના એ જ લેવામાં આવે તો ઈલેક્ટ્રૉન માઈક્રોસ્કોપની વિભેદન શક્તિ અને પીળા પ્રકાશનો ઉપયોગ કરતા ઓપ્ટીકલ માઈક્રોસ્કોપની વિભેદનશક્તિ વચ્ચે સરખામણી કરો.

11.34 કોઈપણ બંધારણની ઉંડાણપૂર્વક માહિતી મેળવવા માટે ઉપયોગી તરંગલંબાઈ તેના બંધારણના આશરે પરિમાણનું માપ દર્શાવે છે. પ્રોટોન અને ન્યુટ્રૉનના ક્વાર્ક બંધારણમાં 10^{-15} m કે તેથી ઓછી લંબાઈના અતિસૂક્ષ્મ માપક્રમના અંતરે જણાય છે. આ બંધારણ વિશે પ્રથમ તપાસ 1970ના સમયગાળામાં, સ્ટેનફોર્ડ, USAમાં રેખીય પ્રવેગક (Linear Accelerator) વડે ઉત્પન્ન કરેલા ઉચ્ચ ઊર્જાના ઈલેક્ટ્રૉન બીમ વડે કરાઈ હતી. કલ્પના કરો કે આ માટે ઈલેક્ટ્રૉન બીમની ઊર્જા કયા ક્રમની હશે ? (ઈલેક્ટ્રૉનની સ્થિર દળ ઊર્જા $=$ 0.511 MeV)

11.35 ઓરડાના તાપમાને ($27\ ^{o}C$) અને 1 atm દબાણે રહેલા હિલિયમ વાયુમાં હિલિયમ પરમાણુ સાથે સંકળાયેલી ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈ શોધો, તથા તેને આ પરિસ્થિતિમાં બે પરમાણુઓ વચ્ચેના સરેરાશ અંતર સાથે સરખાવો.

11.36 કોઈ ધાતુમાં $27\ ^{o}C$ તાપમાને રહેલા ઈલેક્ટ્રૉનની ડિ બ્રોગ્લી તરંગલંબાઈની ગણતરી કરો અને તેને ધાતુમાં રહેલા બે ઈલેક્ટ્રૉન વચ્ચેના સરેરાશ અંતર સાથે સરખાવો જે લગભગ 2×10^{-10} m જેટલું આપેલ છે.

(***નોંધ :*** સ્વાધ્યાયો 11.35 અને 11.36 દર્શાવે છે કે સામાન્ય પરિસ્થિતિઓમાં વાયુના અણુઓ સાથે સંકળાયેલા તરંગ પેકેટ સંપાત થતા નથી, જ્યારે ધાતુમાં ઈલેક્ટ્રૉનના તરંગ પેકેટ એકબીજા પર પ્રબળ રીતે સંપાત થયેલા હોય છે. આ દર્શાવે છે કે, સામાન્ય વાયુમાં વાયુના અણુઓને એકબીજાથી અલગ પાડી શકાય છે, જ્યારે ધાતુમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રૉનને એકબીજાથી અલગ પાડી શકાતા નથી. આ અભેદપણું ઘણા પાયાના અનુમાનો તરફ દોરી જાય છે જે તમે આગળ ઉપર ભૌતિકશાસ્ત્રના ઉચ્ચ અભ્યાસમાં જાણશો.

11.37 નીચે આપેલા પ્રશ્નોના જવાબ આપો :

(a) પ્રોટોન અને ન્યુટ્રૉનમાં રહેલા ક્વાર્કસ અપૂર્ણાંક વિદ્યુતભારો [$(+2/3)e$; $(-1/3)e$] ધરાવતા હોવાનું માનવામાં આવે છે. આવું મિલિકનના પ્રયોગો દરમિયાન કેમ જોવામાં ન આવ્યું ?

(b) e/m એ જોડાણમાં ખાસ નવું શું છે ? શા માટે આપણે એકલા e કે m વિશે વાત કરતા નથી ?

(c) શા માટે સામાન્ય દબાણે વાયુઓ અવાહક અને ખૂબ ઓછા દબાણે વાહક બનવા લાગે છે ?

(d) દરેક ધાતુને એક ચોક્કસ કાર્યવિધેય હોય છે. જો આપાત પ્રકાશ એકરંગી હોય તો શા માટે બધા ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન સમાન ઊર્જા સાથે બહાર નીકળતા નથી ? શા માટે ફોટો ઈલેક્ટ્રૉન ઊર્જા વિતરણ ધરાવે છે ?

(e) ઈલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા અને વેગમાન, તેમની સાથે સંકળાયેલ દ્રવ્ય તરંગની આવૃત્તિ અને તરંગલંબાઈ સાથે આ સમીકરણો વડે સંકળાયેલા છે :

$$E = h\nu, \ p = \frac{h}{\lambda}$$

અહીં λનું ભૌતિક મહત્વ હોવા છતાં, νનાં મૂલ્ય (અને તેથી ફેઝ (કલા) ઝડપ, $\lambda\nu$)નું કોઈ ભૌતિક મહત્વ નથી. શા માટે ?

પરિશિષ્ટ (APPENDIX)

11.1 તરંગ-કણ દ્વિધા (ફલીપ-ફલોપ)નો ઈતિહાસ (The History of Wave-Particle Flip-Flop)

પ્રકાશ શું છે ? આ સવાલ માનવજાત માટે લાંબા સમયથી અનુત્તર હતો. પરંતુ આશરે ચાર સદી પહેલાં વિજ્ઞાન અને ઓદ્યૌગિક યુગના પ્રારંભ સાથે વિજ્ઞાનીઓએ આયોજનબદ્ધ પ્રયોગો કર્યા. આ જ અરસામાં, પ્રકાશ શેનો બનેલો છે તેના સૈદ્ધાંતિક ખ્યાલો (મૉડેલો)નો વિકાસ થતો ગયો. વિજ્ઞાનની કોઈ પણ શાખામાં મૉડેલ બનાવવા માટે એ જરૂરી છે કે તે સમયગાળા દરમિયાન ઉપલબ્ધ બધાં પ્રાયોગિક અવલોકનોને તે સમજાવતું હોવું જોઈએ. આથી, સત્તરમી સદીમાં મળેલા કેટલાક અવલોકનોનો સારાંશ જાણવો યોગ્ય રહેશે.

એ સમયે પ્રકાશના જે ગુણધર્મો જાણીતા હતા તેમાં (a) પ્રકાશનું સીધી રેખામાં પ્રસરણ, (b) સમતલ અને વક્ર સપાટીઓ પરથી પરાવર્તન, (c) બે માધ્યમોની સીમા પાસે વક્રીભવન, (d) જુદા જુદા રંગમાં વિભાજન, (e) વધુ ઝડપનો સમાવેશ થાય છે. પ્રથમ ચાર ઘટનાઓ માટે યોગ્ય નિયમો ઘડવામાં આવ્યા હતા. ઉદાહરણ તરીકે, સ્નેલ દ્વારા 1621માં વક્રીભવન માટેનો નિયમ તારવવામાં આવ્યો હતો. ગૅલિલિયોના સમયથી શરૂ કરીને કેટલાય વિજ્ઞાનીઓએ પ્રકાશની ઝડપ માપવા માટે પ્રયત્ન કર્યો હતો. પરંતુ તેઓ તેમ કરી શક્યા ન હતા. એમણે ફક્ત એટલો જ નિષ્કર્ષ કાઢ્યો કે તે (પ્રકાશનો વેગ) તેમની માપનની સીમાથી વધુ હતો.

સત્તરમી સદીમાં પ્રકાશના બે મૉડેલ પણ આપવામાં આવ્યા હતા. સત્તરમી સદીના શરૂઆતના દશકાઓમાં ડેસ્કાર્ટસે (Descartes) સૂચવ્યું હતું કે પ્રકાશ કણોનો બનેલો છે, જ્યારે હાઈગેન્સે (Huygens) આશરે 1650-60ની આસપાસ સૂચવ્યું કે પ્રકાશ તરંગોનો બનેલો છે. ડેસ્કાર્ટસનું સૂચન એ ફક્ત તત્વજ્ઞાનનું મૉડેલ હતું જે કોઈ પ્રયોગ કે વૈજ્ઞાનિક તર્ક ધરાવતું ન હતું. ત્યારબાદ તરત 1660-70 ના ગાળામાં ન્યૂટને ડેસ્કાર્ટસના કણ સ્વરૂપ મૉડેલને આગળ ધપાવ્યું, જે *કોર્પસ્ક્યુલર* (*Corpuscular Theory*) *સિદ્ધાંત* તરીકે જાણીતું છે; તેને વૈજ્ઞાનિક સિદ્ધાંતોના આધારે વિકસાવ્યું અને તેના આધારે કેટલાક જાણીતા ગુણધર્મો સમજાવ્યા. પ્રકાશના તરંગ કે કણ સ્વરૂપના આ મૉડેલ્સ, એક અર્થમાં તો એકબીજાથી તદ્દન વિરુદ્ધ પ્રકારના છે. પરંતુ બંને મૉડેલ પ્રકાશના જાણીતા ગુણધર્મો સમજાવી શકતા હતા. બંનેમાંથી કયું માનવું તે વિચારવું જરૂરી ન હતું.

ત્યાર પછીની સદીઓમાં આ મૉડેલોના વિકાસનો ઈતિહાસ રસપ્રદ છે. 1669માં બાર્થોલીનસે (Bartholinus) કેટલાક સ્ફટિકો દ્વારા પ્રકાશના દ્વિ-વક્રીભવન (Double refraction) ની શોધ કરી, અને 1678માં હાઈગેન્સ (Huygens) એ ઝડપથી તેમના પ્રકાશનું તરંગ સ્વરૂપ દર્શાવતા સિધ્ધાંતના આધારે તેની સમજૂતી આપી. આમ છતાં, લગભગ સો વર્ષ સુધી, ન્યૂટનનું કણ સ્વરૂપ મૉડેલ દઢતા પૂર્વક માનવામાં આવતું હતું અને તરંગ મૉડેલની સરખામણીમાં વધુ સ્વીકારાયું હતું. તેનું અંશતઃ કારણ આ મૉડેલની સરળતા અને અંશતઃ કારણ ન્યૂટનનું તે સમયના ભૌતિકવિજ્ઞાન પર પ્રભૂત્વ પણ હતું.

ત્યારબાદ 1801માં, યંગે બે-સ્લીટનો પ્રયોગ કર્યો અને વ્યતિકરણ શલાકાઓ મેળવી. આ ઘટના ફક્ત તરંગ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાઈ હતી. તે પણ ખ્યાલમાં આવ્યું કે વિવર્તન પણ એવી ઘટના છે કે જે ફક્ત તરંગ સ્વરૂપ વડે જ સમજાવી શકાય છે. હકીકતમાં, તે પ્રકાશના માર્ગમાં દરેક બિંદુ પોતે પણ ગૌણ તરંગો ઉત્પન્ન કરે છે તેવા હાઈગેન્સના સિધ્ધાંતની કુદરતી ફલશ્રુતિ રૂપે મળે છે. પ્રકાશને કણોનો બનેલો ધારીને આ પ્રયોગો સમજાવી શકાતા નથી. 1810ની આસપાસ બીજી એક ઘટના ધ્રુવીભવનની શોધાઈ અને તે પણ ફક્ત તરંગ સ્વરૂપ દ્વારા સમજાવી શકાઈ. આમ, હાઈગેન્સનો તરંગ સ્વરૂપનો સિદ્ધાંત આગળ વધ્યો જ્યારે ન્યૂટનનો કણ સ્વરૂપનો સિદ્ધાંત પાછળ ધકેલાઈ ગયો. આ પરિસ્થિતિ લગભગ એક સદી સુધી રહી.

ઓગણીસમી સદીમાં પ્રકાશની ઝડપ શોધવા માટે વધુ સારા પ્રયોગો થયા. વધુ ચોક્કસાઈભર્યા પ્રયોગો દ્વારા શૂન્યાવકાશમાં પ્રકાશની ઝડપ માટે 3×10^8 m/s મૂલ્ય મળ્યું. 1860ની આસપાસ મેક્સવેલે વિદ્યુત ચુંબકત્વ માટેના સમીકરણો આપ્યા અને એમ જાણવા મળ્યું કે તે વખતે જાણીતી દરેક વિદ્યુતચુંબકીય ઘટનાને મેક્સવેલના ચાર સમીકરણો વડે સમજાવી શકાય છે. ત્યારે જ મેક્સવેલે દર્શાવ્યું કે વિદ્યુત અને ચુંબકીયક્ષેત્રો ખાલી અવકાશ (શૂન્યાવકાશ)માં વિદ્યુત ચુંબકીય તરંગોના રૂપમાં પ્રસરણ પામે છે. તેમણે આ તરંગોની ઝડપની ગણતરી કરી અને 2.998×10^8 m/s જેટલું સૈદ્ધાંતિક મૂલ્ય મેળવ્યું. આ મૂલ્યની પ્રાયોગિક મૂલ્ય સાથેની ગાઢ સંમતિએ દર્શાવ્યું કે પ્રકાશ વિદ્યુત ચુંબકીય તરંગોનો બનેલો છે. 1887માં હર્ટ્ઝે આ તરંગોની ઉત્પત્તિ અને તેમને પરખવા (તેમનું અસ્તિત્વ જાણવા)નું નિદર્શન કર્યું. આનાથી પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપના સિદ્ધાંતનો પાયો મજબૂત બન્યો. આપણે કહી શકીએ કે જો અઢારમી સદી પ્રકાશના કણ સ્વરૂપના મૉડેલની હતી, તો ઓગણીસમી સદી પ્રકાશના તરંગ સ્વરૂપના મૉડેલની હતી.

1850-1900ના ગાળા દરમિયાન ઉષ્મા અને તેને લગતી ઘટના કે જે ભૌતિકવિજ્ઞાનના તદ્દન અલગ ક્ષેત્રો છે તેને સંબંધિત ઘણા પ્રયોગો થયા. (વાયુનો) ગતિવાદ અને થર્મોડાયનેમિક્સ જેવા સિદ્ધાંતો અને મૉડેલો રજૂ થયા જેમણે, એક સિવાયની બીજી બધી ઘટનાઓ ખૂબ સફળતાપૂર્વક સમજાવી.

પરિશિષ્ટ

કોઈ પણ તાપમાને ($T \neq 0$ K) રહેલો દરેક પદાર્થ વિવિધ તરંગલંબાઈના વિકિરણોનું ઉત્સર્જન કરે છે. તે તેના પર આપાત થતા વિકિરણનું શોષણ પણ કરે છે. જે પદાર્થ તેના પર આપાત થતા બધા જ વિકિરણોનું શોષણ કરે તેને *કાળો પદાર્થ* કહેવાય. બિંદુવત દ્રવ્યમાન કે નિયમિત ગતિની જેમ આ પણ ભૌતિકવિજ્ઞાનનો એક આદર્શ ખ્યાલ છે. કાળા પદાર્થ વડે ઉત્સર્જાયેલા વિકિરણની તીવ્રતા વિરુદ્ધ તરંગ લંબાઈનો આલેખ *કાળા પદાર્થનો વર્ણપટ* (*Black Body Spectrum*) કહેવાય છે. એ દિવસો દરમિયાન કોઈ પણ સિદ્ધાંત કાળા પદાર્થના સંપૂર્ણ વર્ણપટને સમજાવી શક્યો ન હતો.

1900માં પ્લાન્ક ને એક નવો જ વિચાર સૂઝ્યો. તેમણે સૂચવ્યું કે જો આપણે વિકિરણનું ઉત્સર્જન, તરંગમાં જેમ સતત થાય છે, તેને બદલે શક્તિના અમુક જથ્થાઓના રૂપમાં થાય છે તેમ ધારી લઈએ તો કાળા પદાર્થના વર્ણપટને સમજાવી શકીએ. પ્લાન્કે પોતે પણ આ ક્વૉન્ટમને પ્રકાશના ગુણધર્મ તરીકે નહિ પણ ઉત્સર્જન કે શોષણના ગુણધર્મ તરીકે ગણ્યા હતા. તેમણે એક સૂત્ર તારવ્યું જે સમગ્ર વર્ણપટ સાથે સહમત હતું. આ એક ગૂંચવી નાખે તેવું તરંગ અને કણ સ્વરૂપનું મિશ્રણ હતું. જેમાં વિકિરણનું ઉત્સર્જન કણ સ્વરૂપે થાય છે, તે તરંગ તરીકે પ્રસરણ પામે છે અને પાછું કણ સ્વરૂપે શોષાય છે ! આ ઉપરાંત, આ સ્વરૂપે ભૌતિક વિજ્ઞાનીઓને પણ ગૂંચવણ ભરી પરિસ્થિતિમાં મૂક્યા. શું આપણે એક જ ઘટનાને સમજાવવા ફરીથી પ્રકાશના કણ સ્વરૂપને સ્વીકારવું જોઈએ ? તો પછી વ્યતિકરણ અને વિવર્તનની ઘટનાઓનું શું, જે પ્રકાશના કણ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાતી નથી ?

પરંતુ ત્યાર બાદ તરત જ 1905માં, આઈન્સ્ટાઈને ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસરને પ્રકાશનું કણ સ્વરૂપ ધારીને સમજાવી. 1907માં ડીબાય (Debye) એ નીચા તાપમાને રહેલા ઘન પદાર્થોની વિશિષ્ટ ઉષ્માને ઘન સ્ફટીકમાં લેટાઈસ દોલનો (Lattice Vibrations)ના કણ સ્વરૂપ વડે સમજાવી. ભૌતિકવિજ્ઞાનના તદ્દન ભિન્ન ક્ષેત્રોમાં આવતી આ બંને ઘટનાઓ ફક્ત કણ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાય છે, તથા તરંગ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાતી નથી. 1923માં, કોમ્પ્ટનના ક્ષ-કિરણોનું વિવર્તન દર્શાવતા પ્રયોગોની સમજૂતી પણ કણ સ્વરૂપ તરફ દોરી ગઈ. આમ ગૂંચવાડો વધતો ગયો.

આ રીતે 1923 સુધી ભૌતિક વિજ્ઞાનીઓએ નીચે મુજબની પરિસ્થિતિઓનો સામનો કરવો પડ્યો. (a) એવી કેટલીક ઘટનાઓ હતી, જેમકે રેખીય પ્રસરણ, પરાવર્તન, વક્રીભવન, જે કણ સ્વરૂપ કે તરંગ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાય છે. (b) એવી કેટલીક ઘટનાઓ જેમકે વિવર્તન અને વ્યતિકરણ, જે ફક્ત તરંગ સ્વરૂપ વડે જ સમજાવી શકાય છે પરંતુ કણ સ્વરૂપ વડે *નહીં*. (c) એવી કેટલીક ઘટનાઓ પણ છે, જેમકે કાળા પદાર્થનું વિકિરણ, ફોટો ઈલેક્ટ્રીક અસર અને કોમ્પ્ટન પ્રકીર્ણન જે ફક્ત કણ સ્વરૂપ વડે સમજાવી શકાય છે, જ્યારે તરંગ સ્વરૂપ વડે *નહીં*. તે સમય ગાળામાં કોઈ કે એવી યોગ્ય ટીપ્પણી પણ કરી હતી કે સોમવાર, બુધવાર અને શુક્રવારે પ્રકાશ કણ સ્વરૂપે વર્તે છે અને મંગળવાર, ગુરુવાર અને શનિવારે તે તરંગ સ્વરૂપે વર્તે છે, જ્યારે રવીવારે આપણે પ્રકાશ વિશે કોઈ વાત જ કરી શકતા નથી !

1924માં ડિ બ્રોગ્લીએ તરંગ-કણ દ્વૈત વિષેનો નવો સિદ્ધાંત આપ્યો, જેમાં તેમણે દર્શાવ્યું કે ફક્ત પ્રકાશના ફોટોન જ નહીં, પરંતુ દ્રવ્યના 'કણો' જેમ કે ઈલેક્ટ્રૉન અને પરમાણુઓ પણ દ્વૈત પ્રકૃતિ ધરાવે છે, જે ક્યારેક કણ સ્વરૂપે અને ક્યારેક તરંગ સ્વરૂપે વર્તે છે. તેમણે તેમના દ્રવ્યમાન, વેગ, વેગમાન (કણ ગુણધર્મો)ને તેમની તરંગ લંબાઈ અને આવૃત્તિ (તરંગના ગુણધર્મો) સાથે સાંકળતું સમીકરણ પણ આપ્યું ! 1927માં થોમસન, અને ડેવિસન અને ગર્મરે, અલગ અલગ પ્રયોગો દરમ્યાન, દર્શાવ્યું કે ઈલેક્ટ્રૉન તરંગ સ્વરૂપે વર્તતા હતા, જે ડિ બ્રોગ્લી દ્વારા દર્શાવવામાં આવેલી તરંગ લંબાઈનું સમર્થન કરતા હતા. તેમનો પ્રયોગ ઘન સ્ફટીકો વડે ઈલેક્ટ્રૉનના વિવર્તનનો હતો, જેમાં પરમાણુઓની સુવ્યવસ્થિત ગોઠવણી ગ્રેટીંગ તરીકે કામ કરે છે. ત્યાર બાદ તરત જ, બીજા 'કણો', જેમકે ન્યુટ્રૉન અને પ્રોટોનના વિવર્તનના પ્રયોગો પણ થયા અને તે પણ ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણને સમર્થન આપતા હતા. આમ, તરંગ કણ દ્વૈત સ્વરૂપને ભૌતિકવિજ્ઞાનના સ્થાપિત સ્વરૂપ તરીકે માન્યતા મળી. આ એવો સિદ્ધાંત હતો, કે જે ભૌતિક વિજ્ઞાનીઓએ વિચાર્યું હતું તે મુજબ ફક્ત પ્રકાશ જ નહીં પરંતુ કણો માટે પણ દરેક ઘટનાઓને સમજાવી શકતો હતો.

પરંતુ હજી સુધી તરંગ કણ દ્વૈત સ્વરૂપ માટે કોઈ સૈધ્ધાંતિક આધાર નહોતો. ડિ બ્રોગ્લીએ આપેલ સિદ્ધાંત ફક્ત કુદરતમાં મળી આવતી સંમિતિ (Symmetry)ના આધારે કરેલો ગુણાત્મક તર્ક હતો. તરંગ-કણ દ્વૈત સ્વરૂપ વધુમાં વધુ એક સિદ્ધાંત હતો, પરંતુ તે કોઈ મજબૂત મૂળભૂત વાદની ફલશ્રુતિ ન હતો. એ સત્ય છે કે બધા જ પ્રયોગો ડિ બ્રોગ્લીના સમીકરણનું સમાધાન કરે છે. પરંતુ ભૌતિકવિજ્ઞાન તે રીતે ચાલતું નથી. એક તરફ પ્રાયોગિક અનુમોદન જોઈએ અને બીજી તરફ રજુ કરેલ મૉડેલને સમજાવવા મજબુત વાદ પણ જોઈએ. ત્યારબાદના બે દશકાઓમાં આ બાબતમાં પ્રગતિ થઈ. 1928માં ડિરાકે વિકિરણ વિશે એક સિદ્ધાંત આપ્યો અને 1930માં હાઈઝનબર્ગ અને પાઉલીએ તેને મજબૂત ટેકો પૂરો પાડ્યો. તોમોનાગા (Tomonaga), સ્વિંગર (Schwinger) અને ફિનમેને (Feynman) 1940ના અંત ભાગમાં બીજા સુધારા કર્યા અને સિદ્ધાંતમાં રહેલી કેટલીક અસંગતતાઓ દૂર કરી. આ બધા જ સિદ્ધાંતોએ તરંગ-કણ દ્વૈત સ્વરૂપને સૈદ્ધાંતિક પાયો પુરો પાડ્યો.

જોકે આ વાત હજી આગળ જાય છે, જે હજી વધુ અઘરી (સંકિર્ણ) બનતી જાય છે અને તે આ નોંધની મર્યાદા બહાર છે. પણ જે કંઈ બન્યું તેની જરૂરી નોંધ આપણે કરી અને હાલ આપણે તેનાથી સંતોષ માનીએ. હવે ભૌતિકવિજ્ઞાનનાં હાલના સિદ્ધાંતોના આધારે નૈસર્ગિક રીતે એ સ્વીકારવામાં આવ્યું છે કે જુદા જુદા પ્રયોગોમાં વિદ્યુતચુંબકીય વિકિરણ તથા દ્રવ્યના કણો તરંગ અને કણ દ્વૈત સ્વરૂપના ગુણધર્મો દર્શાવે છે, અને ક્યારેક એક જ પ્રયોગ દરમિયાન જુદા જુદા વિભાગમાં તે દ્વૈત સ્વરૂપ દર્શાવે છે.